TURING 图灵新知

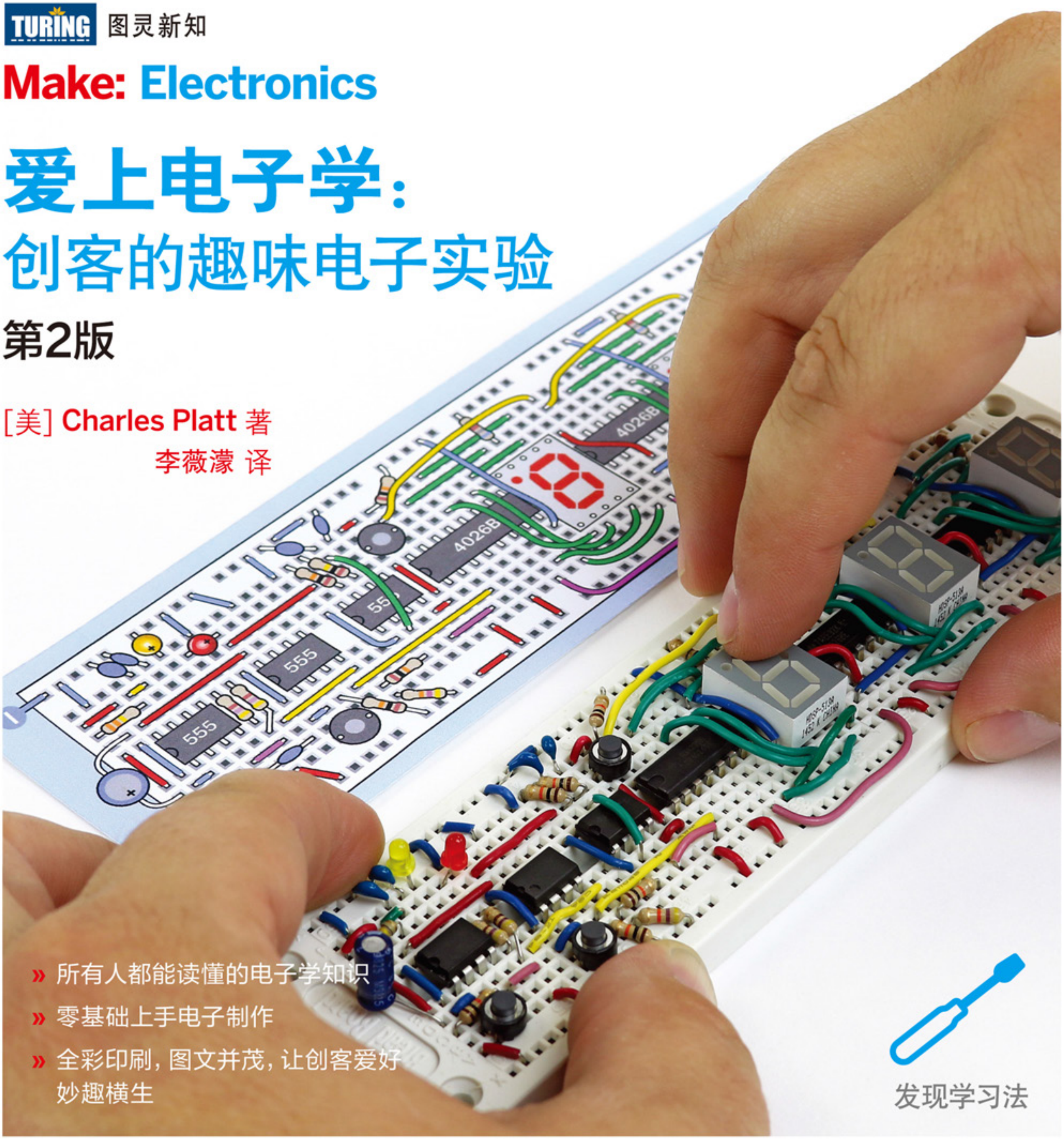
Make: Electronics

爱上电子学：创客的趣味电子实验

第2版

[美] Charles Platt 著

李薇濛 译



» 所有人都能读懂的电子学知识

» 零基础上手电子制作

» 全彩印刷，图文并茂，让创客爱好妙趣横生

发现学习法

中国工信出版集团

人民邮电出版社

POSTS & TELECOM PRESS

数字版权声明

图灵社区的电子书没有采用专有客户端，您可以在任意设备上，用自己喜欢的浏览器和PDF阅读器进行阅读。

但您购买的电子书仅供您个人使用，未经授权，不得进行传播。

我们愿意相信读者具有这样的良知和觉悟，与我们共同保护知识产权。

如果购买者有侵权行为，我们可能对该用户实施包括但不限于关闭该帐号等维权措施，并可能追究法律责任。

译者介绍

李薇濛 2015年毕业于北京航空航天大学电子信息工程专业，电子信息工程、英语双学位。现于中国石油大学（北京）攻读英语翻译硕士。曾获2014年全国大学生英语能力竞赛特等奖。参与北航《卫星导航信号接收处理技术实验教程》的编写和无线电导航设备手册的翻译工作。翻译出版了《电子工程师必读：元器件与技术》。拥有全国翻译专业资格二级笔译证书。

TURING 图灵新知

爱上电子学：
创客的趣味电子实验（第2版）

Make: Electronics

［美］Charles Platt 著
李薇濛 译

Beijing • Cambridge • Farnham • Köln • Sebastopol • Tokyo
O'Reilly Media, Inc.授权人民邮电出版社出版

人民邮电出版社
北　京

图书在版编目（C I P）数据

爱上电子学 : 创客的趣味电子实验 / (美) 查尔斯•普拉特 (Charles Platt) 著 ; 李薇濛 译. -- 2版. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2017.1
（图灵新知）
ISBN 978-7-115-43686-3

Ⅰ. ①爱… Ⅱ. ①查… ②李… Ⅲ. ①电子技术—实验—普及读物 Ⅳ. ①TN-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第253770号

内 容 提 要

本书由简到繁，呈现了一系列有趣的电子实验，从最简单的电阻一直讲到精巧复杂的单片机，引导读者探索各种电子元器件，以及它们背后的原理。本书实验方式新奇，实验现象有趣，原理讲解深入浅出，内容图文并茂，语言亲切流畅。读者可以在阅读的过程中轻松领略电子世界的神奇。关于实验用具，书后还附有详细的介绍以及购买指南，方便读者自己动手，开启发现之旅。

本书适合所有心怀好奇的读者。

◆ 著 [美] Charles Platt
译 李薇濛
责任编辑 朱 巍
执行编辑 张 憬
责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 http://www.ptpress.com.cn
北京 印刷

◆ 开本：880×1230 1/24
印张：15.75
字数：521千字 2017年1月第1版
印数：1 -4 000册 2017年1月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字：01-2016-4632号

定价：99.00元

读者服务热线：(010)51095186转600 印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315
广告经营许可证：京东工商广字第 8052 号

版权声明

献　　辞

献给本书第 1 版的读者，他们为本书的第 2 版贡献了很多想法和建议。特别感谢：Jeremy Frank、Russ Sprouse、Darral Teeples、Andrew Shaw、Brian Good、Behram Patel、Brian Smith、Gary White、Tom Malone、Joe Everhart、Don Girvin、Marshall Magee、Albert Qin、Vida John、Mark Jones、Chris Silva 和 Warren Smith。其中几位还自愿审阅了书稿，筛查其中的错误。读者的反馈仍然是极佳的资源。

第 1 版读者赞誉

“通篇无处不能体会到作者的用心良苦，感受到作者的诚意和对电子制作的热爱。Charles 是权威专家，但他的文字绝不机械，也不高高在上，就像邻家友人在真挚地邀请你体验他所热爱的事物，并真诚地希望你也能从中感受到他的喜悦。”

——天花板恶魔

“这本书棒极了，适合对电子学心怀好奇的人。作者带着你从最简单的实验做起，先‘品尝’电的味道，用柠檬做电池，用电池点亮 LED 小灯，然后再接触稳压器、计时器、焊接、集成电路，还有编程。图表清晰、讲解详细，充满知识又妙趣横生，这本书一定能让你对电子学上瘾。”

——Wayne

“我学的是物理专业，看了这本书以后，我真希望教授能这样教我们，让概念和计算都变得轻松易懂，学习效率也可以得到大大提高。”

——Dawn

“从十岁的孩子到专业人员，我为很多人指导过电子制作。这本书为我提供了十分全面的资源。新晋电子发烧友有时会比较紧张，他们可以从这本书里获得宽慰和指导。概念和电路的介绍十分严谨，文字总带着鼓励。我会把这本书推荐给我的学生。”

——darrrsha

“我学电子的时候 40 多岁——现在 50 多了。我买过给孩子用的电子制作 DIY 套装，可是我不会玩。这么些年来我一直在努力理解这些元件是怎么工作的，这可不仅仅是为了把它们拼在一起。我想知道电阻、电容、晶体管到底是什么。这本书帮了我的大忙。我向所有电子初学者推荐这本书，无论你是 9 岁、29 岁还是 59 岁。”

——kevanf1

第 2 版新增内容

新版对第 1 版全篇进行了改写，并更换了大多数照片和电路图。

与第 1 版一样，本书全部使用**单总线电路板**，以降低连线错误的风险。这样的改动需要我们重建电路，但我相信是值得的。

本书使用了**展示元件布置的电路图**，而非电路板电路的照片。我觉得电路图更清楚。

本书重新绘制了**电路板的内部连接图**，以匹配上述修正。

本书增加了工具和配件的**新照片**。对于较小的物件，我使用了有刻度的背景以明示尺寸。

我尽量采用较便宜的元件。我一直都在努力降低采购成本。

本书对下面三个实验进行了彻底修正：

- 第 1 版的实验使用 LS74*xx* 系列芯片，这一版使用 74HC*xx* 芯片，目的是与书中其他部分相一致，并符合现代应用。
- 使用单结晶体管的项目变成了使用两个双极型晶体管的非稳态多谐振荡器电路。
- 关于微控制器的章节，将 Arduino 作为最受创客欢迎的硬件来介绍。

另外，我删去了两个涉及使用 ABS 塑料进行车间加工的项目，很多读者认为这两个项目用处不大。

我们希望本书在未来的许多年中都很实用，对读者有帮助。

前言：如何从本书中获得乐趣

每个人都使用电子设备，但是大多数人并不了解设备内部的运行原理。

你可能觉得自己并不需要了解这些。不了解内燃机的工作原理也能开车，那为什么要学习电学和电子学的知识呢？

我认为有以下三个理由。

- ❒ 通过学习技术原理，你能更好地掌控自己的世界，而不是被世界所控制。遇到困难时，你可以挺身而出解决它们，而不是对着它们垂头丧气。
- ❒ 应用了正确的学习方法，学习电子学会很有趣。相关的花销也不高。
- ❒ 电子学知识可以提升你作为雇员的价值，甚至还可能为你的职业开辟一片新天地。

发现学习法

大多数入门指南都从定义和理论写起，先解释一些基本概念，以电路图辅助说明所讲解的内容。学校的科学课通常也遵循相似的做法。我称之为**解释学习法**。

本书采用了另一种方法。我希望你能投入其中，动手将元件组合起来。你不必知道该有什么样的结果。等观察到了现象，你就会理解正在发生的事情。这就是**发现学习法**，我认为这种方法更有趣，也更容易记住知识。

在探究的基础上工作会有犯错误的风险。但是我认为这并不是坏事，因为犯错误也是一种宝贵的学习方法。我倒希望你把东西烧毁，把实验弄得一团糟，从而发现你所使用的部件拥有怎样的特性和局限。本书自始至终使用极低的电压，敏感元件可能受损，但是你不会受伤。

发现学习法的核心要求就是动手。单纯阅读本书，你会得到一些知识，但是亲自实验，你会拥有更加宝贵的经验。

而且，你需要的工具和元件都非常廉价。比起刺绣之类的消遣，爱好电子学的花销可少多了，你也不需要车间，所有工作都可以在桌面上完成。

会不会很难?

我假定你对基本知识并不了解，因此，最初几个实验会非常简单，你甚至用不到原型板或烙铁。

我相信概念理解起来并不困难。当然，更正式地学习电子学并自己设计电路会有一定的难度。但是本书将理论缩到最简，你要做的数学运算也只有加减乘除。知道小数点如何移位会对理解本书有帮助，但这不是必需。

本书结构

入门图书一般会以两种方法进行讲解：教程或知识性。这两种方法我都要使用。

如下标题的章节侧重教程：

- ❒ 实验
- ❒ 需要的物品
- ❒ 注意

实验是本书的核心。我将实验进行了排序，因此你在一开始获得的知识可以应用于之后的项目。我建议你按照顺序进行实验，尽量避免跳跃。

如下标题的章节侧重知识性：

- ❒ 基础知识
- ❒ 理论知识
- ❒ 背景知识

我认为知识十分重要（否则不会把它们收录到书中），但是如果你比较着急，可以随便看看，或者干脆跳过，回头再看。

如果电路不能工作

通常，只有一种连接方法能使电路工作，但是有上百种犯错误的方式阻碍电路工作。因此你很可能遇到这些困难，除非你能非常小心，有条不紊地操作。

当电路元件已经连接好却无法工作时，我能理解你是多么沮丧。但是如果你搭建了不能工作的电路，请首先遵循我所建议的故障追踪程序（见第 2 章的基础知识：故障追踪一节）。我将尽我所能回复读者的邮件，解答电路故障问题，但是你们应该先尝试自己解决问题。

沟通反馈

出现以下三种情况时，我们就需要沟通了。

- ❒ 如果我发现书中存在错误，会阻碍你的项目成功实施，我会通知你。如果我发现书中提到的相关元器件存在问题，我也会通知你。这是我向你反馈。
- ❒ 如果你认为本身内容或提到的元器件存在错误，你也可以通知我。这是你向我反馈。
- ❒ 如果你在做实验时遇到困难，而且不知道是我的问题还是你自己的问题，你就需要帮助。这是问题反馈。

我将说明如何处理这三种情况。

我向你反馈

如果你已经以 *Make: More Electronics* 注册过，就不需要再次以本书注册了。如果你还没有注册，请阅读下面的注册方法。

没有你的联系信息，我就无法通知你本书内容或相关元器件所存在的错误。因此，请把邮箱地址发送给我。你的邮箱不会被滥用，不会用于其他任何目的。我的通知包括如下内容。

- ❒ 若在本书及其姊妹篇 *Make: More Electronics* 中发现严重错误，我将通知你，并提供修改方法。
- ❒ 若在本书或 *Make: More Electronics* 配套的元件中发现错误或问题，我将通知你。
- ❒ 若本书或 *Make: More Electronics* 出了全新的版本，或我的其他著作出了全新版本，我也会通知你。这种通知估计寥寥无几。

我们都见过注册卡，只要注册就能获得一次抽奖机会。我来跟你做一笔更好的交易。你提交邮箱地址（仅用于以上三种目的），我将发给你一个未发表过的电子项目，其中包括一份完整的构建方案，是两页 PDF 文件。它非常有趣，十分独特，实现起来也比较容易。除此之外，没有其他获取途径。

我鼓励你参与的原因是：如果我发现了一个错误，但没有办法告诉你，而你后来自己发现了这个错误，你很可能会十分恼火。这不利于我的名誉，也不利于我著作的声誉。避免你的抱怨对我十分有利。

你只需向 make.electronics@gmail.com 发送一封空邮件（如果你愿意，加上一些评论也行）。请在邮件主题中注明 REGISTER。

你向我反馈

如果你只是想告诉我你发现了错误，最好使用出版社维护的勘误表系统。出版社使用勘误表中的信息，在新版本中修正错误。

如果确定发现了错误，请登录以下网址，页面上会有如何提交勘误表的说明：http://shop.oreilly.com/category/customer-service/faq-errata.do。

问题反馈

我很忙，但是如果附上故障项目的照片，我可能会给你提供建议。照片非常重要。

你可以向 make.electronics@gmail.com 提问。请在邮件主题中注明 HELP。

公开讨论

关于此书，网上有很多论坛，你可以在论坛上讨论并提出问题，但是你要清楚你作为读者所拥有的力量，并合理使用这种力量。一条负面评论造成的影响可能比你所想象的更严重，它可以压过好几条正面评论。

我收到的回应一般都非常积极，但是也有几次，人们对于无法在网上买到零件感到恼火。如果他们询问我，我肯定会很乐意帮助他们的。

我大概每个月看一次亚马逊上的该书评论，对必要的评论会进行回复。

当然，如果你只是不喜欢我的写作方式，也可以说出来，不必拘谨。

继续学习

学完本书，你将掌握电子学中的很多基本原理。如果你想学习更多知识，我认为我的 *Make: More Electronics* 是理想的下一本教材。它略难一些，但是同样使用了我提及的发现学习法。我的目的是使你最终对电子学有中等程度的理解。

我的水平还不足以写出一本高级指南，因此我还没打算再写第三本书，比如 *Make: Even More Electronics*。

如果你想了解更多的电子学理论，可以看看 Paul Scherz 写的《实用电子元器件与电路基础》（*Practical Electronics for Inventors*）。这是我推荐次数最多的书。即使你不是发明家，它也很有帮助。

Safari® Books Online

Safari Books Online（http://www.safaribooksonline.com）是应运而生的数字图书馆，同时以图书和视频的形式出版世界顶级技术类和商务类书籍作者的专业作品。

技术专家、软件开发人员、Web 设计师、商务人士和创意专家等人士在开展调研、解决问题、学习和认证培训时，都将 Safari Books Online 视作获取资料的首选渠道。

Safari Books Online 向企业、政府机构、教育机构和个人提供各种产品组合和灵活的定价策略。

用户可通过功能完备的数据库检索系统访问 O’Reilly Media、Prentice Hall Professional、Addison-

Wesley Professional、Microsoft Press、Sams、Que、Peachpit Press、Focal Press、Cisco Press、John Wiley & Sons、Syngress、Morgan Kaufmann、IBM Redbooks、Packt、Adobe Press、FT Press、Apress、Manning、New Riders、McGraw-Hill、Jones & Bartlett、Course Technology 等几十家出版社的上千种图书、培训视频和正式出版之前的书稿。要了解 Safari Books Online 的更多信息，我们网上见。

如何联系我们

请将与本书有关的评论和问题寄往出版方：

Make: 杂志社：

1160 Battery Street East, Suite 125 San Francisco, CA 94111 877-306-6253（美国或加拿大）

707-829-0515（国际或本地）

对于在自家后院、地下室和车库中开展奇妙项目的机智群体，*Make:* 将他们联合起来，为他们提供灵感、资讯和乐趣。*Make:* 赞美自主进行的各种技术工作。*Make:* 杂志的读者持续成长，发展着蓬勃向上的文化和社区，相信我们的环境、我们的教育体系，我们的整个世界都会变得更美好。这已经超越了读者群体，这是 *Make:* 正在引领的一项世界性运动——我们称之为“创客运动”。

若想获得更多关于 *Make:* 的信息，请访问我们的网站：

Make: 杂志：http://makezine.com/ magazine/

Maker Faire：http://makerfaire.com

Makezine.com：http://makezine.com

Maker Shed：http://makershed.com/

本书有一个专用网址，我们在此列出勘误表、示例和其他附加信息。你可以访问此网址：http://bit.ly/make_elect_2e。

若想评论本书或询问技术性问题，请发送邮件到：bookquestions@oreilly.com。

电子书

扫描如下二维码，即可购买本书电子版。

致　谢

我和学校的朋友们一起知道了电子学。在发现这个词之前，我们还只是几个小书呆子。Patrick Fagg、Hugh Levinson、Graham Rogers 和 John Witty 向我展示了新的可能。

Mark Frauenfelder 带我找回了动手制作的习惯，Gareth Branwyn 协助我写了本书第 1 版，Brian Jepson 策划了这本新版。这三位是我认识的最好的编辑，我也十分喜欢他们。大多数作者都没有我这么幸运。

我也非常感谢 Dale Dougherty 带我开启了新的领域，我从未想到这一行如此重要，感谢他接纳我加入。

Russ Sprouse 和 Anthony Golin 搭建电路并进行了测试。Philipp Marek、Fredrik Jansson 和 Steve Conkin 进行了技术验证。如果本书仍旧存在错误，请不要怪罪于他们。我犯一个错误比别人发现一个错误要容易得多。

目　录

第 1 章　基础知识 1

购物清单 1
实验 1：尝尝电的味道！ 7
实验 2：短路一个电池吧！ 13
实验 3：第一个电路 19
实验 4：可变电阻 23
实验 5：制作电池 37

第 2 章　开关 45

购物清单 45
实验 6：非常简单的开关 56
实验 7：研究继电器 65
实验 8：继电振荡器 71
实验 9：时间与电容器 82
实验 10：晶体管开关 91
实验 11：光和声 100

第 3 章　学点更重要的东西 108

购物清单 108
实验 12：焊接两根导线 119
实验 13：烧烤 LED 132
实验 14：可穿戴的脉冲发光体 135
实验 15：防入侵报警器（第一部分） 143

第 4 章　芯片，你好！........154
购物清单........154
实验 16：产生脉冲........159
实验 17：设置你的音调........170
实验 18：（基本）完成防入侵报警器........178
实验 19：反应速度测试器........194
实验 20：学习逻辑........208
实验 21：强大的组合........220
实验 22：快手抢答........230
实验 23：翻转和弹跳........239
实验 24：有趣的骰子........243

第 5 章　接下来做什么........258
工具、设备、元件和耗材........258
实验 25：磁性........265
实验 26：桌面上的发电系统........269
实验 27：扬声器拆解........275
实验 28：让线圈起来反抗........279
实验 29：滤掉某些频率分量........282
实验 30：让信号失真........291
实验 31：无电源、无焊接的收音机........296
实验 32：当硬件遇到软件........303
实验 33：检测真实的世界........319
实验 34：更好的骰子........327
结语........341

第 6 章　工具、设备、元件和耗材........342
套装........342
在线搜索和购物........342
耗材和元件清单........349
购买工具和设备........359

第 1 章 基础知识

1

这一章包括 5 个实验。

在实验 1 中，我想让你实实在在地尝尝电的味道！你将切身感受电流并发现电阻的本质，而不是仅在电路和元件中接触电流。

实验 2 到实验 5 将向你展示如何测量并理解电压和电流，最终讲述如何利用日常用品在桌面上发电。

即使你已经拥有电子学基础知识，我也鼓励你先做一做这些实验，然后再去后续章节探险。这些实验很有趣，也能澄清一些基本概念。

购物清单

本书的每一章都会首先描述要用到的工具、设备、元件和配件，并配图。了解这些物品之后，你可以跳到书末去查看归纳好的购买选项，快速查阅相关信息。

- 购买工具和设备时，请参考第 6 章的**购买工具和设备**。
- 购买元件和配件时，请参考第 6 章的**耗材和元件清单**。
- 若更希望获得一套包装好的元件，你可以选择套件。参考第 6 章的**套装**一节以获得更多信息。

从钳子到万用表之类的物品，我将它们归类为**工具和设备**。这些东西十分常用。诸如导线、焊料这样的**耗材**会在各种各样的项目中消耗掉，我建议你购买的量应当足够做完本书所有的实验了。**元件**会作为项目的一部分予以列出。

万用表

我将从万用表开始简要讲解工具和设备方面的知识，因为我认为万用表是最重要的设备。它会告诉你电路任何两点之间的电压大小，还有通过电路的电流大小。它可以帮助你发现接线错误，也可以测量元件的电阻值或电容值（即储存电荷的能力）。

如果你的基础知识不多，就会对这些术语感到困惑。你可能觉得万用表看起来很复杂，用起来也很困难。其实不然，万用表能让学习过程更容易，它显示了你看不见的事物。

在讨论购买哪种万用表之前，我可以告诉你哪种万用表不要买。不要购买那种老式的教学用万用表，就是图 1-1 显示的中间有一根指针在刻度盘上摆动的那种，那是模拟万用表。

你需要一块数字万用表，能够将测量值以数字形式显示——为帮助你了解可用的设备，我收集了四块万用表作为示例。



图 1-1　模拟万用表不能满足你的需求，你需要一块数字万用表

图 1-2 展示的是我能找到的最便宜的数字万用表。它比一本平装小说或六听汽水还要便宜。它无法测量太高的阻值和太低的电压，精度也很低，还不能测量电容。但是它也能帮助你完成本书的实验，如果你预算很紧的话，就可以买这种。

图 1-3 中的万用表精度更高，也有更多功能。学习电子学的话，这种万用表或类似的万用表是不错的基本选择。



图 1-2　我能找到的最廉价的万用表



图 1-3　与这块万用表类似的万用表都是很好的基本选择

图 1-4 中的万用表略贵一些，但是制作更加精良。这个型号的万用表已经停止生产了，但是你还能买到跟它类似的万用表，价格可能是图 1-3 中 NT 牌万用表的两三倍。Extech 是一家成立很久的公司，面对打廉价牌的竞争对手，它依然努力维护自己的产品质量。

图 1-5 展示的是写作本书时我个人最喜欢的万用表。它的外表有些破旧，但是具备我需要的所有功能，量程很广，精度非常高。但是，它的价格是最便宜的万用表的二十倍。我把它作为一项长期投资。



图 1-4　一块制作更精致的万用表，价格也多少更贵一些



图 1-5　一块高质量万用表

如何确定买什么样的万用表呢？学开车的时候不一定需要一辆很贵的车，同样，初学电子学的时候也不需要很昂贵的万用表。另一方面，极为便宜的万用表可能有一些缺点，例如内部保险丝不容易更换，或者旋转开关磨损太快。因此，这里有一条经验法则，想要买到我认为比较便宜但是可以接受的物品。

> 在 eBay 网上寻找价格最低的商品，将它的价格提高一倍，按照这个价格去买。

无论你花了多少钱，以下万用表的属性和功能都是最重要的。

量程

一块万用表可以测量的值范围很大，因此需要有一种方法来缩小量程。有些万用表具有**手动量程**，可以动手转动刻度盘，为你所需的待测量值选择量程。例如，量程可以是 2 V~20 V。

其他万用表可以**自调量程**，这更加方便，因为你只需连接好万用表，它就能将所需量测出来。但是，这里的关键词是“等待”。每次用自调量程万用表测量时，都要等几秒钟。此时万用表内部在求值。我自己会比较不耐烦，所以更喜欢手动量程万用表。

自调量程的另一个问题是，因为量程不是自己选择的，所以你必须注意万用表显示屏上字母提示的测量单位。例如，在测量电阻时，k 和 M 之间的差异是 1000 倍。据此，我要给出个人建议：

> 我建议你在刚开始探索电子学时使用手动量程万用表。这样出错的可能性会更低，开销也会稍微少一些。

供应商对万用表的描述应当说明该万用表采用的是手动量程还是自调量程。如果没有说明，你也可以从选择器刻度盘的照片上看出来。如果刻度盘周围没有任何数字，那它就是自调量程万用表。图 1-4 中的万用表是自调万用表，其他图片中的万用表都不是。

测量值

刻度盘也可以表明万用表能进行什么类型的测量。至少，你应当预期它能测量以下物理量。

电压、电流和电阻，通常简记作字母“V”“A”和符号“Ω”（希腊字母欧姆，见图 1-6）。你现在可能还不知道这些特性都是什么意思，但它们都是非常基础的物理量。

你的万用表也应该能以毫安（简记作 mA）为单位测量电流，以毫伏（简记作 mV）为单位测量电压。从万用表的刻度盘上可能无法直接看出这一点，但是说明书会列出来。

DC/AC 分别指直流电（Direct Current）和交流电（Alternating Current）。有的万用表用 DC/AC 按钮进行选择，有的在主选择器刻度盘上选择。按钮会更方便一些。

连续性测试这一实用功能可以让你检测出电路中的连接故障或中断。理想情况下，它会发出声音警报。它的代表符号是一个小点，周围发散出一圈圈弧线，如图 1-7 所示。

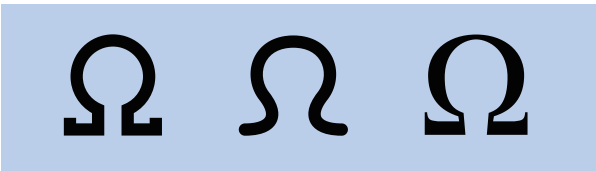


图 1-6　希腊字母 Ω 的三个例子，用于表示电阻



图 1-7　这个符号表示检测电路连续性的选项，带有声音反馈，这是非常实用的功能

再多花一点点钱，你就可以买到一块能测量下列物理量的万用表了，以下按照重要程度的顺序列举。

电容：一种在大多数电子电路中广泛使用的小型元件。因为小元件的容值通常不印刷在外壳上，所以测量它们的值非常重要。当一些元件混淆或掉在地上（更糟）时更是如此。非常便宜的万用表通常无法测量电容值。可以测量电容的万用表通常用字母“F”表示该功能，即测量单位法拉，也可以用简称 CAP（Capacitance）表示。

晶体管测试：由标号为 E、B、C、E 的小孔指示。将晶体管插入小孔中，万用表可以帮助你核实晶体管应当以何种方向连入电路，或者你是否已将其烧坏。

频率：单位简记为 Hz。它在本书的实验中不重要，但是如果你继续深入探究，这个物理量在测量频路时会很有用。

除此之外的其他特性不甚重要。

如果你对于购买什么样的万用表仍不确定，请继续阅读实验 1 至实验 4，了解一下万用表如何使用。

护目镜

在实验 2 中，你可能会用到护目镜。最便宜的塑料护目镜就能满足要求。电池爆炸的风险几乎不存在，也不太可能有太大的冲击力。

普通的眼镜是可以接受的替代品。你也可以通过一小片透明的塑料观察实验（例如，从塑料水瓶上剪下一片）。

电池和导线

因为电池和导线是电路的一部分，所以我将它们归为元件一类。关于订购这些部件的细节，请查看第 6 章**其他元件**一节。

本书几乎所有的实验都会使用 9 V 电源，你可以从超市或便利店买到。稍后我会建议你将电源升级为交流整流器，但是现在还不用这么做。

在实验 2 中，你会用到几个 1.5 V 的 AA 电池，而且必须是碱性电池。一定不要使用任何类型的充电电池进行这个实验。

为了将电池的电能传输到电路中，你需要为 9 V 电池配备导线，如图 1-8 所示，以及单个 AA 电池架，如图 1-9 所示。电池架一个就足够了，但是我建议最好准备三个 9 V 连接器，以备后续使用。



图 1-8　从 9 V 电池传输电能的连接器

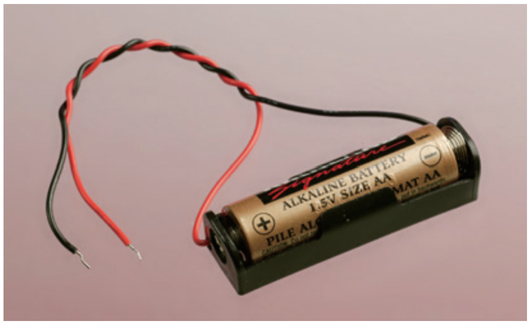


图 1-9　你需要图中所示的单个 AA 电池架，不要购买能放多节电池的电池架

测试引线

在前几个实验中，你会用到将元件互相连接的测试引线。我指的引线类型是**双头引线**。当然，任何一段引线都有两个头，那么为什么还要叫它“双头引线”呢？这一术语通常意味着引线的两端都装有**弹簧夹**，如图 1-10 所示。每个夹子通过抓取并握紧物品形成连接，解放了你的双手。

不要使用两端是插头的测试引线。它们有时称作跨接线。

本书中，测试引线归类为设备。请参考第 6 章的购买工具和设备一节，以获得更多信息。

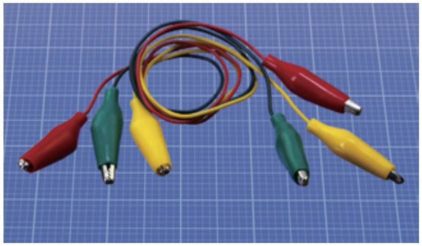


图 1-10　两端有弹簧夹的双头测试引线

电位器

电位器的功能类似于老式立体声系统中的音量控制。以现代标准衡量，图 1-11 所示的电位器体积比较大。但是这里需要的就是大电位器，因为你要用测试引线上的弹簧夹夹住电位器的末端。建议使用直径 1 英寸①的电位器。它的阻值应标明 1 k。如果你要自己购买电位器，请参考第 6 章其他元件一节以获得更多细节。



图 1-11　前几次实验所需的普通类型电位器

保险丝

当通过电路的电流过大时，保险丝会阻断电路。理想情况下，你应当购买图 1-12 所示的 3A 汽车保险丝。测试引线很容易夹紧它，其内部结构也清晰可见。汽车保险丝有多种物理尺寸出售，但是只要你使用的是 3A 保险丝，尺寸就不重要。请购买三根保险丝，实验中要人为熔断一根，剩下的用来保护电路。如果不想通过汽车零件供应商购买，你可以选择电子元件供应商的 2AG 尺寸 3A 玻璃套筒保险丝，如图 1-13 所示。但是它用起来不太方便。

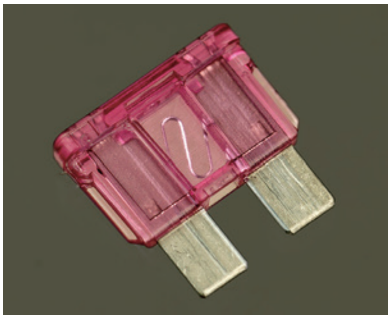


图 1-12　这种汽车保险丝比电子硬件中的套筒保险丝使用更方便



图 1-13　你可以使用此类套筒保险丝，但是弹簧夹不太容易夹好它

① 英制单位和公制单位的转换详见第 3 章背景知识：让人抓狂的度量制一节。——编者注

发光二极管

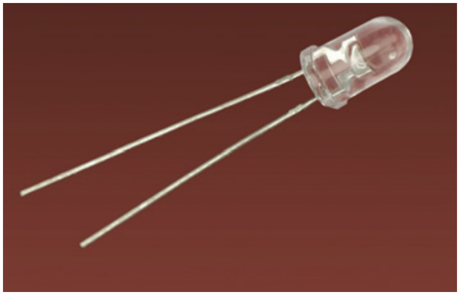


图 1-14　一个发光二极管直径大约 5 mm

发光二极管（Light Emitting Diode，LED）名气响亮，形态各异。我们要使用的发光二极管，其正确的称呼是 LED 指示器，在分类上通常描述为标准通孔 LED。图 1-14 中的示例二极管直径为 5 mm，但是在空间有限的情况下，直径 3 mm 的二极管更容易安装。两种都能用。

本书中的二极管都是通用发光二极管，即不会高强度发光的最廉价 LED，通常有红、黄、绿等颜色。这些 LED 经常成批出售，用途广泛，建议你每种颜色至少买一打。

一些通用 LED 包装在“无色透明”的塑料或树脂中，但是施加电压时会发出彩色光。其他 LED 的包装塑料或树脂所染颜色与 LED 的发光颜色相同。两种类型都是可以接受的。

有几个实验建议使用低电流 LED，它们略贵一些，但是更灵敏。例如，实验 5 用临时准备的电池产生一个小电流，使用低电流 LED 会得到更好的实验结果。如果你不使用套件提供的元件，请参考第 6 章其他元件一节，获取额外的指导。

电阻器

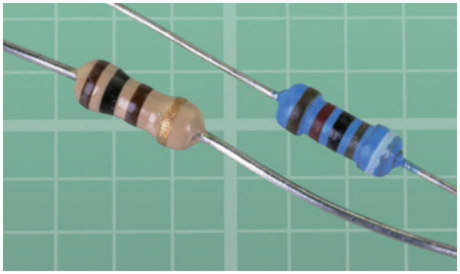


图 1-15　你要用到的两种电阻器，额定功率均为 1/4 W

电路的各部分需要用多种电阻器限制电压和电流。它们看起来如图 1-15 所示。电阻器外壳的颜色并不重要，后面我会解释彩色条纹是如何表示器件阻值的。

如果你要自己购买电阻器，那就不要只选择单个实验要用的阻值。它们又小又便宜，多买一些才是聪明之举。你可以从剩余物品商店、打折商店或 eBay 网上购买预包装好的一整批电阻器。要获得关于电阻器的更多信息，包括本书所用电阻器阻值的完整列表，请参考第 6 章元件一节。

从实验 1 到实验 5，你需要的元件就这么多。现在，就让我们开始吧！

实验 1：尝尝电的味道！

你能尝到电的味道吗？这个实验给人的感觉是，可以。

需要的物品

- ❐ 万用表
- ❐ 9 V 电池 1 块

这就足够了！

注意：电压不要超过 9 V

这个实验只需要一块 9 V 电池。不要使用更高的电压，也不要使用能输出更大电流的大电池。而且，如果你的牙齿上戴了金属牙套，一定要小心不要让牙套碰到电池。最重要的是，永远不要用任何尺寸的电池向皮肤的破损处通入电流。

过程

润湿舌头，用舌尖去接触 9 V 电池的金属端子，如图 1-16 所示。（可能你的舌头没有图中那么大。我的也肯定没有那么大。但是不管你的舌头是大是小，这个实验都会有效果。）

你感觉到刺痛了吗？现在把电池放在一边，伸出舌头，用纸巾彻底擦干舌尖。再次用舌尖去触碰电池，你会感到刺痛减轻。

这是怎么回事？我们用万用表来研究研究。



图 1-16 一个勇敢的实验者检测碱性电池的特性

设置万用表

你的万用表自带电池吗？选择刻度盘上的任何一个功能，观察显示屏上是否有示数。如果什么都没有显示，你就可能需要打开万用表，放入电池，才能开始使用它。要想知道如何打开万用表，请查阅万用表附带的说明书。

万用表带有一红一黑两根表笔。每根表笔的一端有一个插头，另一端有钢制探针。将插头插入万用表上的插孔内，用探针触碰电路中你想要检测的点。如图 1-17 所示。探针能够探测电流，同时又不会释放过大的电流。本书所介绍的实验涉及的电流和电压都很小，你在实验时是不会被探针伤到的（除非你用尖尖的探针戳到了自己）。

大多数万用表有三个插孔，但也有四个插孔的。请参考图 1-18、图 1-19、图 1-20 中的示例。以下是一般法则。

- 应该有一个插孔标记为 COM。这个插孔适用于所有的测量。将黑色引线插入该插孔中，并保持不变。
- 另一个插孔应该有伏特（V）和欧姆（Ω）字母符号，可以测量电压或电阻。将红色引线插入该插孔中。
- 伏特 / 欧姆插孔也可以用来测量 mA（毫安）单位的小电流，你也可能看见测毫安电流的专用插孔，需要把红色引线插入其中。我们一会儿会讲到。
- 还有一个插孔可能标有 2A、5A、10A、20A 等类似的数值，表明能测量的最大电流。这是用来测量大电流的，本书的项目用不到它。

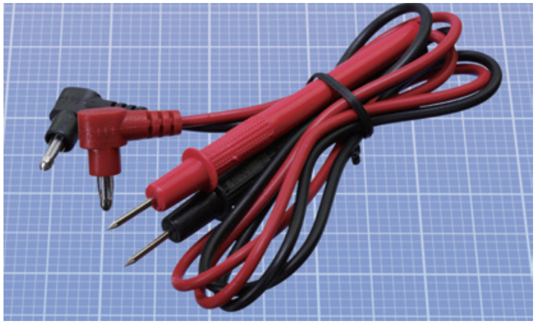


图 1-17　万用表表笔，末端是金属探针



图 1-18　注意这块万用表上的插孔标记

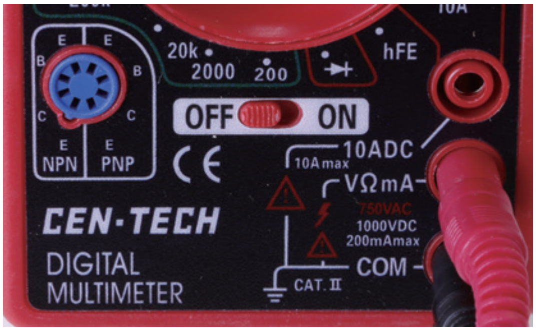


图 1-19　这块万用表上的插孔功能分配不太一样



图 1-20　另一块万用表上的插孔

基础知识：欧姆

接下来你要测量自己舌头的电阻值是多少欧姆——但是，欧姆是什么呢？

我们用英里或公里作为距离单位，用磅或千克作为质量单位，用华氏度或摄氏度作为温度单位，用欧姆作为测量电阻的单位。欧姆是一个国际单位，以电学先驱格奥尔格 • 西蒙 • 欧姆（Georg Simon

Ohm）的名字命名。

希腊字母 Ω 表示欧姆。大于 999 欧姆的电阻，单位要用字母 kΩ，它表示千欧，即一千欧姆。例如，阻值 1500 Ω 计作 1.5 kΩ。

当阻值大于 999 999 Ω 时，就要用大写字母 M 表示，它代表兆欧，即一百万欧姆。2.2 MΩ 就是 220 万欧姆。

图 1-21 展示了欧姆、千欧、兆欧之间的转换关系。

欧姆	千欧	兆欧
1 Ω	0.001 k	0.000 001 M
10 Ω	0.01 k	0.000 01 M
100 Ω	0.1 k	0.000 1 M
1000 Ω	1 k	0.001 M
10 000 Ω	10 k	0.01 M
100 000 Ω	100 k	0.1 M
1000 000 Ω	1000 k	1 M

图 1-21　最常见的欧姆倍数转换表

在欧洲，字母 R、K、M 代替小数点，以此降低出错的风险。因此，欧洲电路图中的 5K6 意为 5.6 kΩ，6M8 意为 6.8 MΩ，而 6R8 意为 6.8 Ω。本书不会使用欧洲的表达方式，但是你会在其他电路图中见到这种表达方式。

对电流阻碍作用较大的材料称为绝缘体。大多数塑料（包括导线外包的彩色护套）都是绝缘体。

电阻很小的材料称为导体。金属（例如铜、铝、银和金）是优良的导体。

测量舌头的电阻

观察万用表前面板上的刻度盘，你至少会发现一个位置标有欧姆符号。将自调量程万用表的刻度盘拨至如图 1-22 所示的欧姆符号处，用探针轻轻地触碰舌头，等待万用表自动选择量程。观察数字显示器上的字母 K。一定不要把探针戳进舌头里！

手动量程万用表则必须人工选择量程，大概 200 kΩ（20 万欧姆）就可以。注意，刻度盘旁的数字是最大值。因此，200 kΩ 代表“不大于 20 万欧姆”。20 kΩ 代表“不大于 2 万欧姆”。请观察图 1-23 和图 1-24 中手动量程万用表的特写。



图 1-22　只需将自调量程万用表的刻度盘拨至欧姆符号即可



图 1-23　手动量程万用表需要选择量程

用探针触碰舌头，探针间的距离约 1 英寸。注意万用表的读数，数值应在 50 kΩ 左右。放下探针，伸出舌头，用面巾纸认真地把舌头彻底擦干，做法同前。在舌头重新湿润之前，重复实验，这次的读数应当更高一些。使用手动量程万用表时，需要选择更大的量程才能测得阻值。

在皮肤湿润（例如出汗）时，电阻会降低。此原理用于测谎仪，在压力大的情况下，故意说谎的人比较容易出汗。

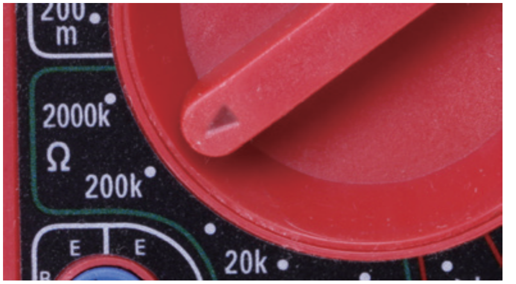


图 1-24　不同的手动量程万用表刻度盘基本用法相同

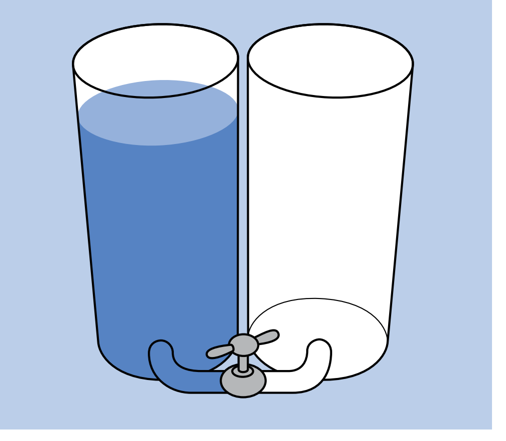
以下是你的实验结论：较低的电阻允许通过更多的电流。而在最初的舌头实验中，更多的电流会使舌头的刺痛感更强烈。

基础知识：电池的内部构造

在最初的舌头实验中，我并没有说明电池的工作方式。现在是时候补上这个遗漏了。

9 V 电池内部的化学物质能够释放电子（带电粒子）。由于化学反应的作用，它们会从电池的一极流向另一极。将电池内部的单元想象为两个水箱——一个是满的，一个是空的。如果用水管和阀门把两个水箱连接起来，打开阀门，水将开始流动，直到两水箱的水面相平为止。图 1-25 会帮助你把这一过程形象化。与之类似，在电池的两极间打开电流通路时，电子将在两极间流动，即使这条通路只存在于你舌头上的水分之中。

电子在某些物质中（例如湿润的舌头）比在其他物质中（例如干燥的舌头）更容易流动。


图 1-25　你可以将电池想象为一对连通的蓄水池

进一步探究

舌头实验并不是一个好控制的实验，因为两次实验中探针之间的距离可能会有微小的变化。你觉得这个变化重要吗？让我们来研究一下。

并排握住万用表的探针，它们之间的距离为 1/4 英寸。用它们触碰湿润的舌头。现在将它们分开 1 英寸，再次触碰舌头。你得到了怎样的读数？

电流经过距离较短时，它会遇到较小的电阻，电流会因此变大。

在你的胳膊上进行一项类似的实验，如图 1-26 所示。可以以固定的步长改变探针之间的距离（例如 1/4 英寸），观察万用表的阻值示数。你认为将探针之间的距离加大一倍会不会使测得的阻值也扩大一倍呢？如何证明你的观点？

若阻值过高，超出了万用表的测量范围，就会显示错误信息（例如字母 L），而不显示数字。润湿皮肤，重复实验，就能得到结果了。唯一的问题是，随着皮肤上的水分蒸发，阻值将会变化。你会发现控制一个实验中的所有因素是多么困难。随机因素的正式名称是**不受控制变量**。

我还有一个变量没有讨论，就是每个探针对皮肤的压力。如果按压的力度加大，我猜想阻值会减小。你能证明这个猜想吗？如何设计一个实验消除这个变量？

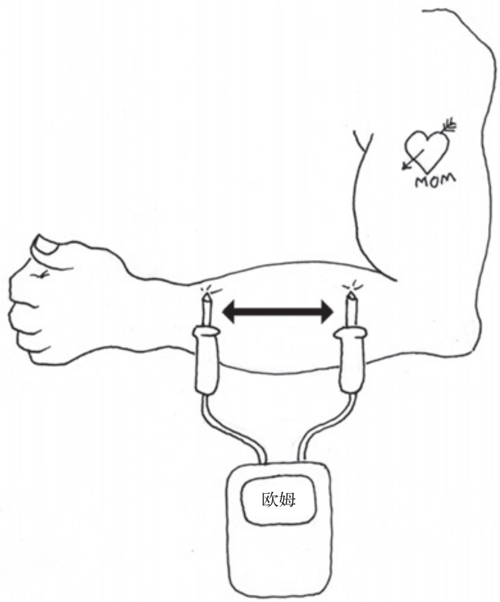


图 1-26　改变探针之间的距离，记录万用表上的读数

如果厌倦了测量皮肤的阻值，你可以尝试把探针泡入一杯水中。然后在水中溶解一些盐，再次测试。你肯定听说过水能导电，但是这个过程可不那么简单。水中的杂质起着很重要的作用。

如果测试没有任何杂质的水的阻值，会发生什么呢？首先要获得一些纯水。所谓的**纯净水**通常在净化之后会添加一些矿物质，这不是你所需要的。同理，**泉水**也不完全纯净。你需要的是**蒸馏水**，也就是**去离子水**。蒸馏水通常能够在超市买到。你会发现，万用表探针间距 1 英寸时，测得的蒸馏水电阻比同等距离下测得的舌头电阻要高。你可以尝试用实验验证一下。

以上是我现在能够想到的与电阻相关的所有实验。我还为你准备了一点背景知识。

背景知识：发现了电阻的人

格奥尔格 • 西蒙 • 欧姆（肖像见图 1-27），1787 年生于德国巴伐利亚州。他默默无闻地工作了大半生，利用自制的导线研究电的性质。（在 19 世纪初，你可没法散步去家得宝买回一卷连接线。）

虽然欧姆的资源有限，数学知识也不够，但是他于 1827 年成功证明了导体（例如铜）的电阻与导体的横截面积成反比，而在温度恒定的情况下，流过导体的电流与施加到导体上的电压成正比。14 年后，伦敦皇家学会终于认识到了欧姆这一贡献的意义，授予他科普利奖章。如今，欧姆的发现被称作欧姆定律。在实验 4 中，我将更加详细地阐述欧姆定律。

清理和回收

在这个实验中，电池应该没有损坏，也没有显著耗散电量。下一次实验可以继续使用。

在把万用表收好之前，要记得把它关上。很多万用表在闲置一段时间后会发出蜂鸣声，提醒你关闭，但是有些万用表不会提醒。在开启状态下，即使没有用来测量任何物体，万用表也有非常小的电流流过。

实验 2：短路一个电池吧！

为了更好地认识电源，下面你要做一件大多数教材都不会让你去做的事情：将一个电池短路。（**短路**就是将电源的两端直接连接。）

注意：请使用小电池

我要描述的这个实验比较安全，但是有些短路情况可能非常危险。千万不要将家中的电源插口短路，那将导致一声巨响，还有明亮的闪光。你所用的导线或工具将部分熔化，从熔融金属中飞出的颗粒会烧伤你，甚至弄瞎你。

如果将汽车电池短路，那么流过的电流会非常大，有可能导致电池爆炸。电池中的硫酸会洒你一身。问问图 1-28 中的家伙你就明白了（如果他还能回答的话）。

锂电池常用在电动工具、笔记本电脑和其他便携式设备中。千万不要短路锂电池，它会起火，把人烧伤。而且，即使你没有将锂电池短路，它也会自燃，如图 1-29 所示。在一些早期的笔记本电脑自毁之后，锂电池的包装就进行了改进，以防止自燃。但是短路锂电池依然是非常糟糕的主意。

这个实验只能使用一节碱性电池，也只能使用单节 AA 电池。你还要带上护目镜，以防所用的电池存在缺陷。



图 1-27　格奥尔格 • 西蒙 • 欧姆，摄于其先驱工作获得荣誉之后。他的大部分工作都在默默无闻中完成



图 1-28　将扳手放在汽车电池接线柱之间，这会危及你的身家性命，即使只有 12 V，只要电池容量足够大，短路都会是一件惊天动地的事情

需要的物品

- ❒ 1.5 V 的 AA 电池 2 块
- ❒ 电池架 1 个
- ❒ 3A 保险丝 2 根
- ❒ 护目镜 1 个（普通的眼镜或太阳镜也可以）
- ❒ 两端有弹簧夹的测试引线 2 条

用电流生热

要使用碱性电池。不要使用充电电池。

将电池放在两端有导线引出的电池架上，如图 1-9 所示。将导线裸露的两端拧在一起，如图 1-30 所示。一开始，好像什么都没有发生，但是等一小会儿，你就会发现导线变热了。再等一会儿，电池也变热了。

热量是由流过导线和电池内部电解液（导电液体）的电流产生的。如果你使用手动气泵给自行车轮胎打过气，就应该知道气泵会变热。电流生热的原理基本相同。可以想象，电流由很多粒子（电子）组成，电子穿过导线会使导线发热。这并不是完美的类比，但是差不多可以帮助我们透彻地理解原理。

电子是从哪里来的呢？电池内部的化学反应释放了这些电子，产生了电压。电压的单位是伏特，根据另一位电学先驱亚历山德罗·伏特（Alessandro Volta）命名。

回到水的类比上来：水箱中水面的高度与水压成正比，这一点与电压类似。图 1-31 能帮助你把这个概念形象化。

但是电压还只是一个方面。当电子流过导线时，一段时间内的电子流量称为安培数，它是由另一位电学先驱安德烈·玛丽·安培（André-Marie Ampère）的名字命名的。电子流通常称为电流。以安培为单位的电流产生了热量。



图 1-29　千万不要瞎摆弄锂电池



图 1-30　认真遵从指示，把电池短路也会比较安全

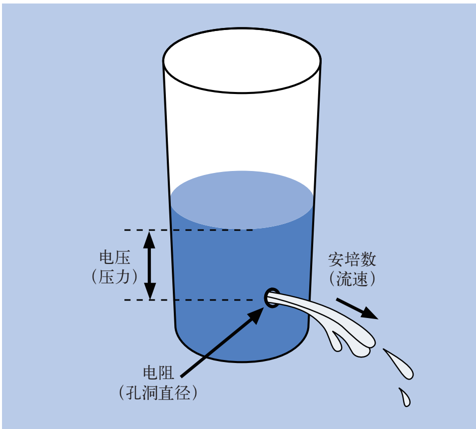


图 1-31　水箱里的水压与电源中的电压类似

❐ 将电压想象成压力。
❐ 将安培想象成流速，这就是电流。

背景知识：为什么舌头不会发烫?

当你的舌头接触 9 V 的电池时，你感觉到的是刺痛，而不是可察觉的发热。当你短路一个电池时，即使所用的电池只有 1.5 V，也能产生可观的热量。如何解释这个差别呢?

万用表显示，舌头的电阻很大，降低了电子流速。

导线的电阻很小。当仅有一根导线连接电池两极时，通过导线的电流比通过你的舌头的电流大得多，从而会产生更多的热量。如果其他所有因素保持不变，那么情况如下所述。

❐ 较低的电阻允许较大的电流通过。
❐ 电流产生的热与一段时间内流过导体的电流量成正比。（若导线的电阻随着导线的温度升高而改变，这一关系就不再准确，但是仍然近似正比。）

以下是另外一些基本概念。

❐ 每秒钟流过的电流用安培（通常简称**安**）度量。
❐ 引起电流的电的压力用**伏特**度量。
❐ 对电流的阻力（电阻）用**欧姆**度量。
❐ 较大的电阻会限制电流。
❐ 较高的电压可以克服电阻、增大电流。

电压、电阻和安培数（压力、阻力和流量）之间的关系如图 1-32 所示。

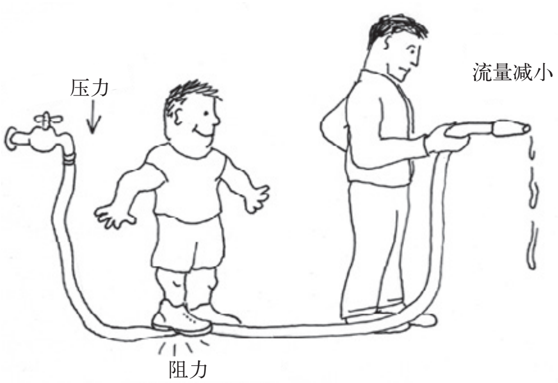


图 1-32　阻力对压力形成阻碍，减小流量，在水中和电流中都是如此

基础知识：伏特

伏特是一个国际单位，用大写字母 V 表示。在美国和欧洲的大部分地区，家用交流电源电压为 110 V、115 V 或 120 V，而重型设备的独立电路电压为 220 V、230 V 或 240 V。固态电子元器件一般都要使用 5 V~20 V 的直流电，而现代表面组装设备使用的电压一般小于 2 V。有的元件（例如麦克风）以毫伏计算工作电压，简记为 mV，1 毫伏是 1 伏特的千分之一。当电力远距离输送时，其大小用千伏计算，简记为 kV。还有一些远距离输电线用兆伏计算电压。毫伏、伏特和千伏之间的转换关系表如图 1-33 所示。

基础知识：安培

安培是一个国际单位，用大写字母 A 表示。家用电器的电流能够达到几安培，而美国的标准断路器额定电流为 20 A。电子元器件的额定电流通常为毫安，简记为 mA，1 毫安是 1 安培的千分之一。液晶显示器的工作电流以微安计算，简记为 μA，1 微安是 1 毫安的千分之一。安培、毫安和微安之间的转换关系表如图 1-34 所示。

毫伏	伏特	千伏
1 mV	0.001 V	0.000 001 kV
10 mV	0.01 V	0.000 01 kV
100 mV	0.1 V	0.0001 kV
1000 mV	1 V	0.001 kV
10 000 mV	10 V	0.01 kV
100 000 mV	100 V	0.1 kV
1000 000 mV	1000 V	1 kV

图 1-33　常见伏特倍数转换表

微安	毫安	安培
1 μA	0.001 mA	0.000 001 A
10 μA	0.01 mA	0.000 01 A
100 μA	0.1 mA	0.0001 A
1000 μA	1 mA	0.001 A
10 000 μA	10 mA	0.01 A
100 000 μA	100 mA	0.1 A
1000 000 μA	1000 mA	1 A

图 1-34　常见安培倍数转换表

如何熔断保险丝

在你短路电池时，究竟有多大的电流流过了电池架上的导线呢？我们能不能测量它？

这并不容易，因为尝试使用万用表测量大电流有可能熔断万用表内部的保险丝。因此，请把万用表放在一旁，我们将使用 3A 保险丝，它不值多少钱，可以牺牲。

首先请仔细检查保险丝，可能的话，用放大镜检查。你应该能在汽车保险丝中央的透明窗口内看到一个微小的 S 形的东西。这个 S 形的东西是一片很容易熔化的薄金属片，如图 1-12 所示。玻璃套筒保险丝中有一片薄导线，起同样的作用。

将 1.5 V 电池从电池架上取下来。电池已经没有什么用了，如果可能的话应当丢进回收箱。把拧在一起的两根导线分开，用两根测试引线连接保险丝和电池架，如图 1-35 和图 1-36 所示。把一节新电池放入电池架，观察保险丝的变化。保险丝中央的金属会熔化从而断裂。图 1-37 和图 1-38 解释了我的意思。

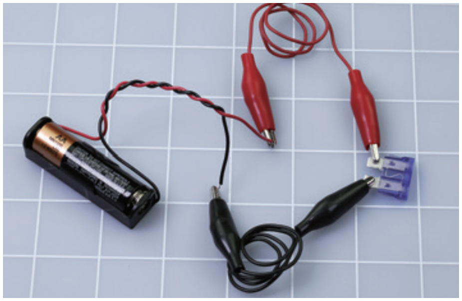


图 1-35　如何熔断汽车保险丝

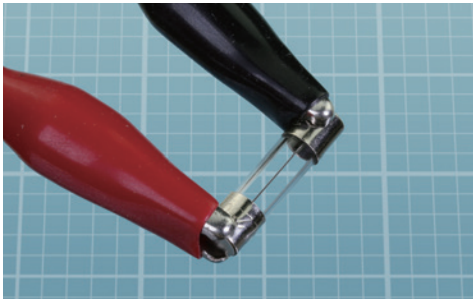


图 1-36　如何将测试引线连接到小型套筒保险丝上

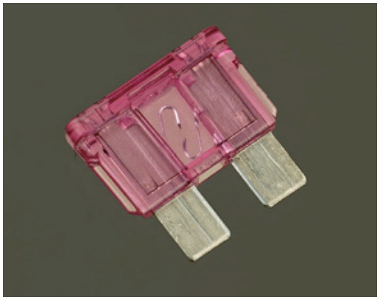


图 1-37　注意保险丝的熔断处

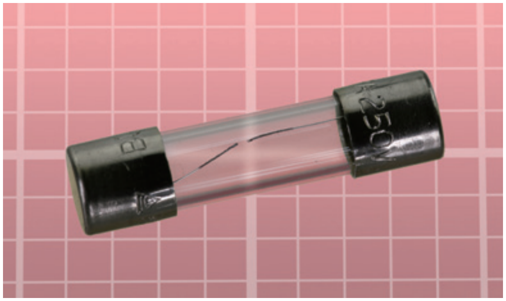


图 1-38　在被短路的套筒保险丝中出现了类似的熔断

虽然额定电流相同，但是有些 3A 保险丝比其他种类的保险丝更容易熔断。如果你觉得保险丝没有变化，那就试一试从电池直接将导线引到保险丝上，不让电流经过测试引线。如果你使用的不是新的 AA 电池，那么可能需要等上几秒钟，保险丝才能有所反应。如果仍不成功，可以试着换成 C 型或 D 型电池，它们的电压与 AA 电池相同，却可以提供更大的电流，但这不是必需的。

保险丝的工作原理是这样的：它熔化自身来保护电路的其余部分。保险丝的微小断裂阻止了更大的电流通过。

基础知识：直流电和交流电

从电池中流出的电流是**直流电**。就如同从水龙头中流出的水流，直流电是沿一个方向流动的稳定电流。

而从家用电源插座得到的电流就十分不同了。插座火线中的电流每秒钟相对于零线从正到负变化 60 次（在很多国家每秒变化 50 次，包括欧洲）。这就是**交流电**，它更像洗车的电动清洗器产生的脉冲水流。

有些目的必须用交流电来实现，例如，长距离输电要升高电压。交流电也常用于电动机和家用电器。电源插座的各部分如图 1-39 所示。这种插座在北美、南美、日本和其他一些国家使用。欧洲的插座看起来不一样，但原理是相同的。

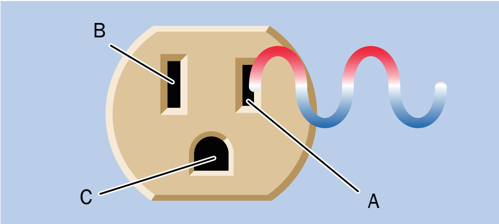


图 1-39　电源插座各部分

图中，A 插孔连着插座的火线，提供一个（相对于插孔 B）正负交变的电压。插孔 B 连着零线。如果电器发生故障，例如内部连线松动，插孔 C 会将电压导入大地，起到保护作用。

在美国，如图所示的插座额定电压是 110 V~120 V。其他配置的插座用于更高的电压，但它们也有火线、零线和地线，三相插座除外，它们主要用于工业用途。

本书的大部分内容谈论的都是直流电，主要有两个原因：第一，大多数简单电子电路都使用直流供电，第二，直流电的表现更容易理解。

后文我将不再重复说明我用的是直流电。请假设所有电源均为直流电源（除非另有说明）。

背景知识：电池的发明者

亚历山德罗·伏特（肖像见图 1-40），1745 年在意大利出生，当时科学还远未分化成各个学科。在研究了化学之后（他于 1776 年发现了甲烷），他成了一名物理学教授，并对所谓的伽伐尼效应（即青蛙的大腿在静电刺激下的抽动现象）产生了兴趣。

伏特用一个装满盐水的酒杯证明，在两种电极之间（一种为铜，另一种为锌）发生的化学反应会产生稳定的电流。1800 年，他对自己的装置进行了改进，将铜板和锌板堆叠起来，二者之间用吸满盐水的纸板分隔。这个“伏特堆”是西方人发明的第一块电池。



图 1-40　亚历山德罗·伏特发现化学反应能产生电流

背景知识：电磁学之父

安德烈·玛丽·安培（肖像见图 1-41），1775 年在法国出生，是个数学神童。他在父亲的图书馆里自学，成为了一名科学教师。他最著名的成就是在 1820 年总结了电磁学理论，描述了电流产生磁场的方法。他还制造了第一台测量电流的仪器（现在称为**检流计**），并发现了氟元素。



图 1-41　安德烈·玛丽·安培发现流过导线的电流会在导线周围产生磁场，利用这个原理，他成为可靠测量安培数（即电流）的第一人

清理和回收

短路的电池已经毁坏，可以丢弃了。不要将废电池扔进垃圾桶，因为电池内含有重金属，会污染生态环境。你所在的州或城镇应该会将电池纳入本地循环利用计划。（加利福尼亚州几乎要求所有的电池循环再利用。）请查询你所在地区的法规，获取细节信息。

熔断的保险丝不能继续使用，可以把它扔掉。

受到保险丝保护的第二节电池应该还可以使用。

电池架也可以继续使用。

实验 3：第一个电路

现在是时候让电来做点有用的事情了。为此，你将利用电阻器、发光二极管等元器件进行实验。

需要的物品

- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 电阻器：470 Ω 1 个、1 kΩ 1 个、2.2 kΩ 1 个
- ❒ 通用 LED 1 个
- ❒ 两端有弹簧夹的测试引线 3 条
- ❒ 万用表 1 块

预备工作

现在让我们熟悉一下电路要用到的最基本元件——小小的电阻器。顾名思义，电阻器阻碍电流的流动。阻值用欧姆来度量。

如果你买了一包极其便宜的电阻器，包装上可能不会有任何标记。不过没关系，我们很容易确定它们的阻值。实际上，即使包装上标记得很清楚，我也希望你能一边实验一边检查电阻器的阻值，因为不同阻值的电阻器很容易混在一起。有两种方法可以确定阻值。

- ❒ 使用万用表，拨到欧姆挡测量。
- ❒ 学习识别印制在大多数电阻器上的彩色编码。下文我将解释它们的含义。

检查了电阻器的阻值后，应该将它们分类放入贴有标签的小塑料元件盒中。我个人比较喜欢美国 Michael 手工艺品连锁店卖的盒子，但是还有其他很多购买渠道。你也可以在 eBay 上搜到小塑料袋。

基础知识：解码电阻器

有些电阻器的阻值用显微打印清楚地标定在外壳上，可以用放大镜看到，如图 1-42 所示。

但是，大多数电阻器外壳上印的都是彩色条纹。图 1-43 展示了彩色编码。

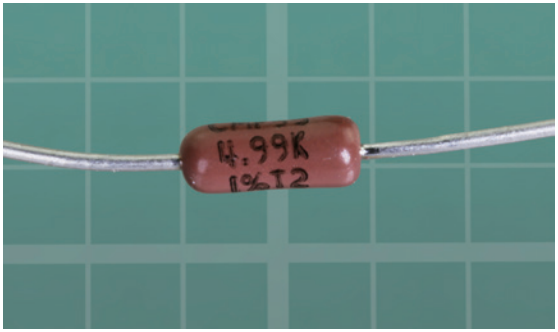


图 1-42　为数不多的电阻器将阻值印在外壳上

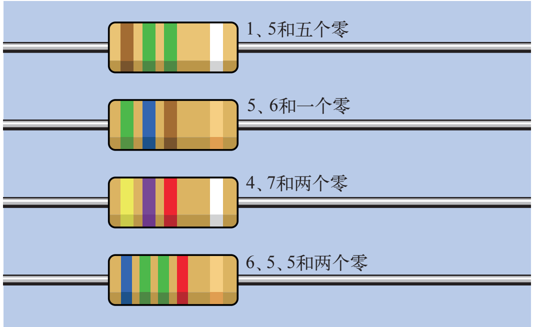


图 1-43　彩色编码电阻器的四个示例

图 1-43 展示的示例电阻器，其阻值从上到下分别为：1.5 MΩ（150 万欧姆），公差 10%；560 Ω，公差 5%；4700 Ω，公差 10%；65.5 kΩ（6.55 万欧姆），公差 5%。

颜色编码可以用以下文字归纳。

- 不必关注电阻器本身的颜色。（白色的电阻器是例外，那可能是防火型，或者已被烧熔，必须用同种类型电阻器替换。但是你不太可能遇到这种情况。）
- 寻找银色或金色的色带。找到之后，将电阻的这一端转到右手侧。银色表示阻值精度在 10% 以内，金色表示阻值精度在 5% 以内。这个叫作电阻器的公差。
- 如果没有找到银色或金色的色带，则转动电阻器，使聚集色带的一侧在左，一般有三条。我将在下面讲解四条色带的情况。

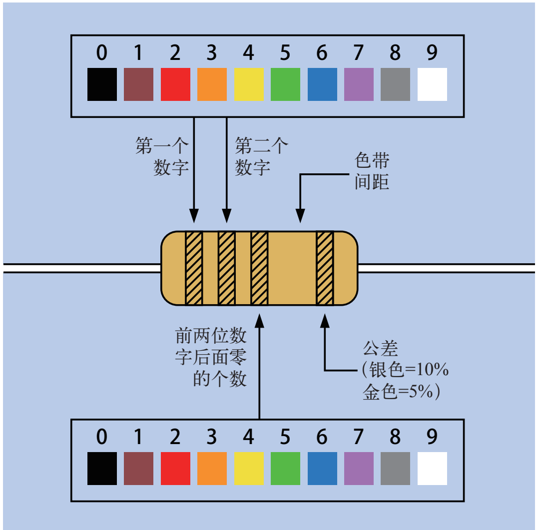


图 1-44　电阻器阻值的编码方法；有些电阻器左侧有四条色带，而不是三条；正文中会有说明

- 从左到右，第一条和第二条色带表示阻值的前两位数字。第三条色带表示这两位数字后面有多少个零。颜色代表的值如图 1-44 所示。

如果遇到的电阻器有四条色带而不是三条，那么前三条色带代表数字，第四条代表零的个数。第三条色带允许电阻取中间值。

糊涂了吧？当然你还可以使用万用表检查阻值，只是要注意，万用表的读数可能与电阻的标称值有微小的差异。这可能是因为万用表不绝对精确，或者因为电阻器不绝对精确，也可能两个原因都有。微小的变化对于本书的项目并没有什么影响。

点亮 LED

现在让我们看一看通用 LED。老式的灯泡将大量电能转化成热量，有些浪费。LED 则精巧得多，它们几乎能将所有电能转化成光，而且寿命几乎无限长（前提是使用得当）！

LED 对于所获电能的量和获得的方式都很挑剔。一定要遵循以下规则。

- LED 伸出的**较长**引脚必须获得较高的电压，较短的引脚必须获得较低的电压。
- 施加在长引脚和短引脚之间的正电压差不得超过制造商给定的限制值（称作**正向电压**）。
- 从长引脚流入 LED、短引脚流出的电流不得超过制造商给定的限制值（称作**正向电流**）。

违反这些规则会有什么后果呢？在实验 4 中你将会看到。

要用的 9V 电池应确保是新的。你可以使用连接器连接电池，如图 1-8 所示，但是我认为把几根测试引线直接夹到电池两极上更容易，如图 1-45 所示。

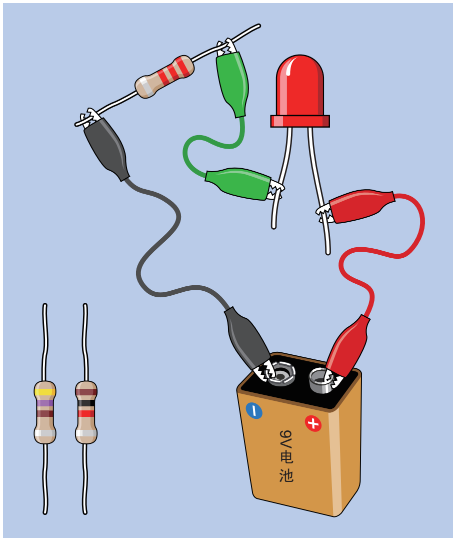


图 1-45　第一个电路，点亮 LED

选择一个 2.2 kΩ 的电阻器。记住，2.2 kΩ 就是 2200 Ω。为什么是 2200 而不是 2000 这样好看的整数呢？下文我会解释。如果你现在就想知道，请参考实验 3 的**背景知识**一节。

2.2 kΩ 电阻器上的色带应为红–红–红，即两个 2 后面再加两个 0。还需要一个 1 kΩ（棕–黑–红）和一个 470 Ω（黄–紫–棕）的电阻器，将它们准备好。

将 2.2 kΩ 电阻器连入图 1-45 所示的电路中，确保电池接入的方法正确，正极在右侧。

- “+”号永远代表“正极”。
- “–”号永远代表“负极”。

确保 LED 的长引脚在右侧，并注意弹簧夹之间不要相互触碰。你会发现 LED 发光很微弱。

现在，换下 2.2 kΩ 电阻器，连入 1 kΩ 的电阻器。LED 会再亮一些。

换下 1 kΩ 的电阻器，连入 470 Ω 的电阻器，LED 会更加明亮。

这看似十分简单，却阐明了一个要点。电阻器阻碍了电路中一部分电流的流动。阻值较高的电阻器阻碍了更多的电流，使得流过 LED 的电流更少。

检测电阻器

我提到过，你可以使用万用表检测电阻器的阻值。这个操作非常简单。过程如图 1-46 所示。首先，不要忘记将万用表设置在欧姆档上。断开电阻器与其他器件的连接，把万用表的探针加在电阻器的两端。如果你用的是手动量程万用表，就必须将量程调到比预计阻值更大，否则会得到错误的读数。

需要注意的一点是，如果将探针用力地按在电阻器的两根引脚上，测得的阻值会更准确。不要用手指捏住电阻器和探针，否则测出的就是你身体的阻值与电阻器的阻值之和了。要把电阻器放置在绝缘表面上（例如非金属桌面），握住表笔的塑料手柄，把金属探针用力地按压在电阻器的引脚上。

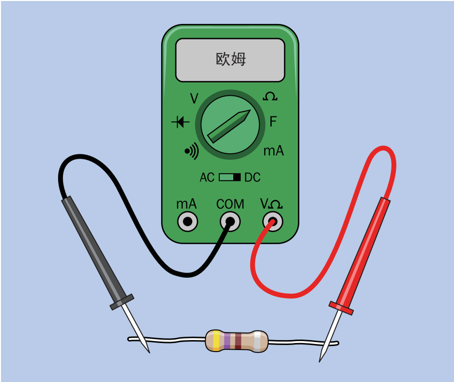


图 1-46　检测电阻器的阻值

或者，你还可以使用几根测试引线。将引线的一端夹到电阻器引脚上，而将另一端夹到表笔的探针上。这样测量电阻就用不到双手了，而且要简单得多。

背景知识：令人不解的数字

在检测了几个电阻器（或者在网上买了几个电阻）之后，你会发现，相同的几组数字总是重复出现。千欧范围内的阻值通常有 1.0 kΩ、1.5 kΩ、2.2 kΩ、3.3 kΩ、4.7 kΩ 和 6.8 kΩ，而万欧范围内的阻值通常有 10 kΩ、15 kΩ、22 kΩ、33 kΩ、47 kΩ 和 68 kΩ。

这几对数字叫作**乘数**，因为将它们乘以 1、1000、10 000、100 或 10，就能得到基本的欧姆电阻值。

乘数取这些值，有逻辑上的原因。很久以前，很多电阻器的精度为正负 20%，因此 1.0 kΩ 电阻器的实际阻值可能高达 1.0×（1+20%）=1.2 kΩ。而 1.5 kΩ 电阻器的实际阻值也可能低至 1.5×（1−20%）=1.2 kΩ。在 1.0 kΩ 和 1.5 kΩ 之间不必再有其他阻值。与之类似，68 Ω 电阻器的阻值可能高达 68×（1+20%）＞80 Ω，而 100 Ω 电阻器的阻值可能低至 100×（1−20%）=80 Ω。因此，在 68 和 100 之间不需要有其他阻值。

在图 1-47 表格的第一行中，白色的数字是电阻器最原始的乘数。尽管现代的电阻器阻值公差达到了 10% 甚至更佳，但这些数字在今天的应用仍然最为广泛。

1.0	1.5	2.2	3.3	4.7	6.8
1.1	1.6	2.4	3.6	5.1	7.5
1.2	1.8	2.7	3.9	5.6	8.2
1.3	2.0	3.0	4.3	6.2	9.1

图 1-47　电阻值和电容值的传统乘数。详细内容参见正文

将白色的数字与黑色的数字组合起来，就得到了精度为 10% 的电阻器乘数。如果再加上蓝色的数字，就得到了精度为 5% 的电阻器乘数。

本书的实验中，我只使用了最常见的六个乘数，这样就减少了你要用到的电阻器种类。如果精度非常重要（例如实验 19 中测量反应速度的电路），你可以使用电位器微调输出电阻——我恰好将在下一个实验中加以展示。

清理和回收

下一个实验中要用到电池和 LED。电阻器在将来的实验中还可重复使用。

实验 4：可变电阻

将能够控制电流的电位器连入电路，可以改变电路的电阻。本实验中的电位器将帮助你学习关于电压和电流的更多知识，并理解电压和电流之间的关系。你还将学习如何阅读生产商的数据表。

需要的物品

- ❒ 万用表
- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 电阻器：470 Ω 1 个、1 kΩ 1 个
- ❒ 通用 LED 2 个
- ❒ 两端有弹簧夹的测试引线 4 条
- ❒ 1 kΩ 线性电位器 2 个

电位器的内部结构

我想让你做的第一件事是观察电位器是如何工作的，而达到这个目的的最佳方式就是拆开电位器。这就是我请你为本实验准备两个电位器的原因——以防你不能将拆开的电位器恢复原状。

本书第 1 版的一些读者提意见说，把电位器撬开很可能会损坏它，这样非常浪费。但是几乎任何学习过程都要消耗一些资源，包括纸、笔、白板笔，等等。如果你真的不想冒险损坏电位器，可以不去拆它，来研究下面的照片。

大多数电位器都是用小金属片固定的，你需要把它们向上弯曲。一种方法是插入一把小刀，把它用作杠杆。另一种方法是用螺丝刀或钳子拆开。我没有为本实验规定任何工具，因为我假定你家里已经有了小刀、螺丝刀或者钳子。

图 1-48 用红圈标记了金属片。（第四片金属片藏在电位器的主轴后面。）图 1-49 展示了金属片

向上、向外弯曲的样子。

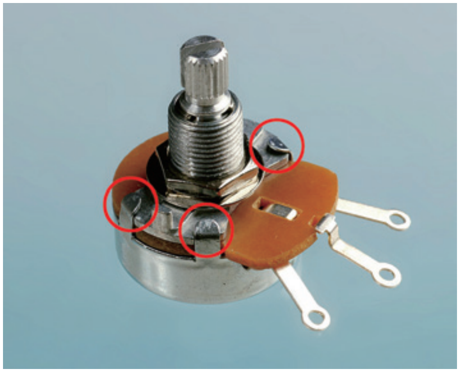


图 1-48　将电位器保持一体的金属片

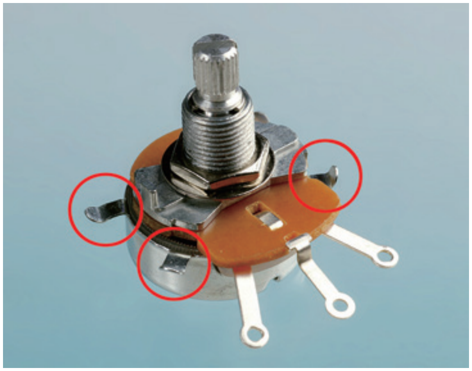


图 1-49　向上、向外弯曲的金属片

在撬开金属片之后，要非常小心地把主轴向上提起，同时用另一只手握住电位器的外壳，电位器应该分离成图 1-50 中的样子。

外壳内部有一条环形**轨道**。可能由导电塑料制成，也可能包覆有细导线，这取决于你购买的是廉价电位器还是稍微高级一些的，如照片所示。无论怎样，原理都相同。导线或塑料具有一定的电阻（在 1 kΩ 电位器中，一共 1000 Ω），随着主轴的转动，一个**滑动片**与电阻摩擦，可以给你提供一条从中心接头到任意点的捷径。图 1-50 用红圈标记了滑动片。



图 1-50　电位器的滑动臂是环形的

你应该能把电位器重新组装好，但是如果有必要的话，可以使用备份的电位器。

测试电位器

将万用表调到电阻档（手动量程的万用表至少要调到 1 kΩ），用两个探针触碰图 1-51 所示的两个相邻接头。你会发现，把电位器的主轴顺时针转动（从上面观察）时，电阻下降到接近于零。把主轴逆时针转动时，电阻上升到约 1 kΩ。现在，将黑表笔保持在原位，用红表笔触碰第三个接头，电位器的电阻变化情况相反。

你觉得中间的接头是否有可能连接到电位器内部的滑动片上呢？另外两个接头是否与轨道的两端相连接呢？

如果把红表笔移到黑表笔的位置上，而把黑表笔移回红表笔原来的位置，它们之间的阻值并不会改变。两个方向测试的结果是一样的。电位器与 LED 不同，后者需要连接正确才能工作，而电位器是没有极性的。

注意：不要外加电源

在测量电阻大小时不要给电路连接电源。测量电阻时，你的万用表会使用内部电池提供的一个小电压。你肯定不希望这个小电压与电池提供的电压产生冲突。

警告：前方破坏性实验

我已经平安无事地将下一个步骤重复了多次，但是有一位读者报告说他的 LED 碎了。要小心一些的话，你可以佩戴护目镜，普通的眼镜也可以。

使 LED 变暗

现在，你可以用电位器控制 LED 的亮度了。将所有元件严格按照图 1-52 所示连接起来。要确定两个弹簧夹已经夹在了接头上。你现在使用的是可变电阻（电位器），而实验 3 用的是定值电阻（图 1-45）。

把那个 LED 放在一边吧。很遗憾，它再也无法亮起来了。

开始时，要逆时针转动主轴（见上文），否则在我们真正开始实验之前，LED 就会烧毁。现在，非常缓慢地顺时针转动主轴，按照蓝色箭头的方向，你会发现 LED 变得越来越亮，越来越亮，直到——喔，它突然熄灭了！你知道现代电子产品是多么容易损坏了吧？当我写出“使 LED 变暗”这个标题时，你可能没有意识到我是要让它永远变暗。

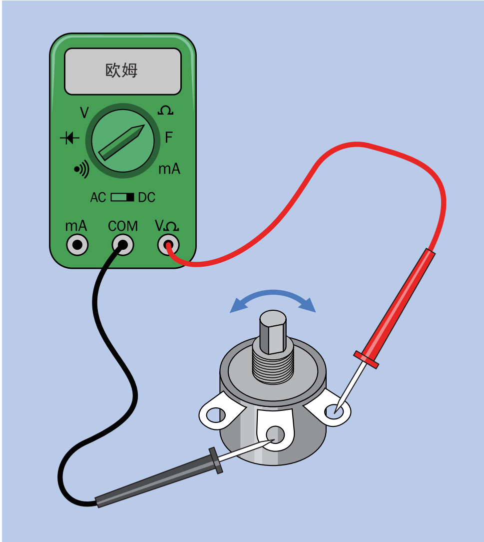


图 1-51　测试电位器性能的过程

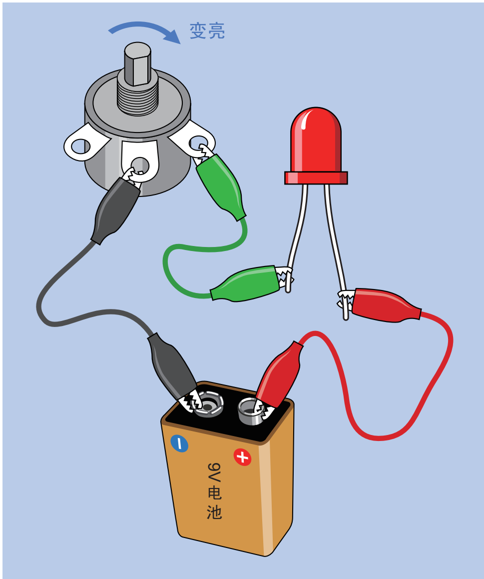


图 1-52　用电位器调节 LED 的亮度

换上一个新的 LED，这次让我们保护好它。加入一个 470 Ω 的电阻器，如图 1-53 所示。电流通过 470 Ω 的电阻器和电位器，这样，即使电位器的阻值降为零，LED 也会受到保护。你可以转动电位器的主轴，而不用担心毁坏任何东西。

我希望你已经明白，LED 太过敏感，不能直接连接到 9 V 的电池上。它一定要用电路中额外的电阻加以保护。

你能直接用一节 1.5 V 电池给 LED 供电吗？试试看。它的亮度可能较低，但 1.5 V 是低于 LED 阈值电压的。让我们找出 LED 究竟需要多大的工作电压。

测量电势差

当电池连入电路时，设置万用表的刻度盘，让它测量直流电压。你可以让红表笔保持不动，因为测量电压的插孔与测量电阻的插孔是相同的。

如果是手动量程万用表，那么要将电压设置为高于 9 V。记住，万用表刻度盘旁边的数字是每个量程的最大值。

现在，用表笔的探针触碰电位器的接头，如图 1-54 所示。试着固定探针的位置，同时把电位器的阻值调高一点，然后再调低一点。你会发现电压随之变化，我们称该电压为探针之间的电势差。

“电势差”就是两点间的电压。

测量 LED 两端的电势差，测量结果会随着电位器的调节而改变，但是变化幅度可能没有你预料的那么大。LED 会进行一定程度的自我调节，随着电压和电流的波动调整自身电阻。

交换红黑表笔的位置会怎样？万用表显示屏上会显示一个负号，它并不会因此而损坏。但是，应该总是用红表笔测量较高的电压，黑表笔测量较低的电压，这样比较清楚明白。

最后，将探针放在电阻器两端，电势差会再一次随着你对电位器的调节而变化。在这个简单电路中，电池提供

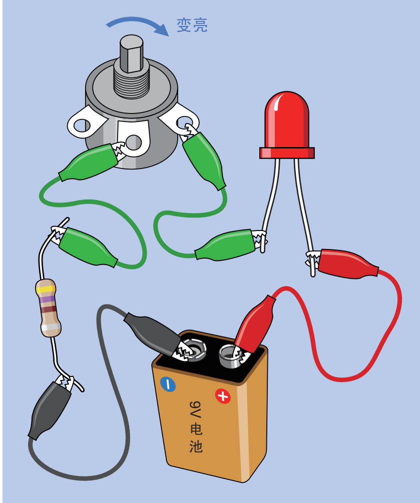


图 1-53　保护 LED

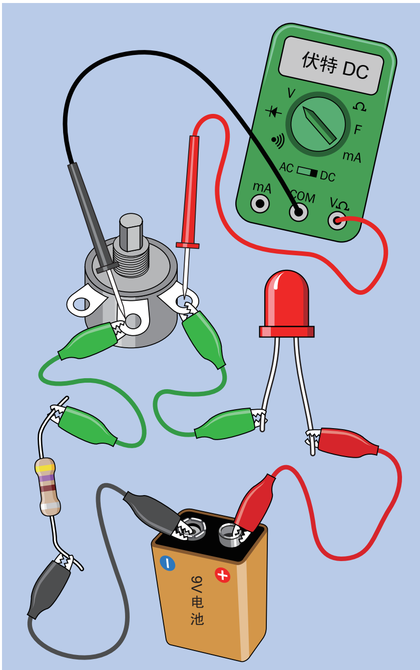


图 1-54　测量 LED 两端的电势差

的电压分配到所有元件两端。当电位器减小自己分配到的那部分电压时，可供电阻器和 LED 使用的电压差增大。而且，当电位器阻值较低时，电路的总电阻也较低，允许通过的电流更大。

以下是需记住的几个要点。

- 将电路中所有设备两端的电势差相加，它们的和与电池提供的电压相等。
- 你测量的是电路中两点之间的相对电压。这就是电势差的含义。
- 在测量电压时，要像使用听诊器一样使用表笔，不要破坏电路中的连接点。

检测电流

现在，我想让你进行另一种测试。把万用表设置到 mA（毫安），测量电路中的安培数。在测量电流时，必须注意以下规则。

- 只有在电流（安培数）流过万用表时，才能对其进行测量。
- 需要把万用表串联连入电路。
- 太大的电流会烧毁万用表内的保险丝。
- 应当使用万用表上标记着“mA”的插孔。它可能正是你目前使用的插孔，也可能不是。

在进行测量之前，要确保万用表的刻度盘已经拨到了 mA。而不是 V。

注意：万用表过载

在测量电流时一定要小心。例如，如果你把万用表的两根表笔直接放置在电池两端，而此时万用表又设置成测量毫安电流，就会造成瞬间过载，万用表内的保险丝也会烧毁。便宜的万用表不附带保险丝，你只好把万用表拆开，查看保险丝的规格，再上网查找相同规格的替代品。这非常烦人（我自己经历过不止一次）。特别便宜的万用表可能连容易替换的保险丝都没有。

- 一定要在电路中有限流元件时测量电流。
- 预先警告：如果你的万用表有一个单独的插孔用于测量电流，那么在确实要测量电流时再把红色引线插入这个插孔。测量完成后，把红色引线插回伏特 / 欧姆插孔。

检测电流

将万用表连入 LED 和电位器之间，如图 1-55 所示。随着将电位器的阻值上下调节，你应该能发现电路中变化的阻值改变了电流——安培数。前一个实验中的 LED 烧毁了，因为过大的电流使它发热，产生的热量熔化了 LED 内部的结构，就像保险丝熔化一样。较高的电阻能够限制安培数。

下面是一个有趣的小测试。将电位器逆时针调到头，记录测到的电流值。

不用重新调整电位器，现在改变万用表的位置，把它连入电池和 LED 之间，如图 1-56 所示。

现在电流是多大？应该和刚才完全一样，或者非常接近。注意，弹簧夹位置的变化会使电路电阻有微小的改变。

在简单电路中，电流的大小处处相同。电子流没有其他地方可去，因此只能相同。

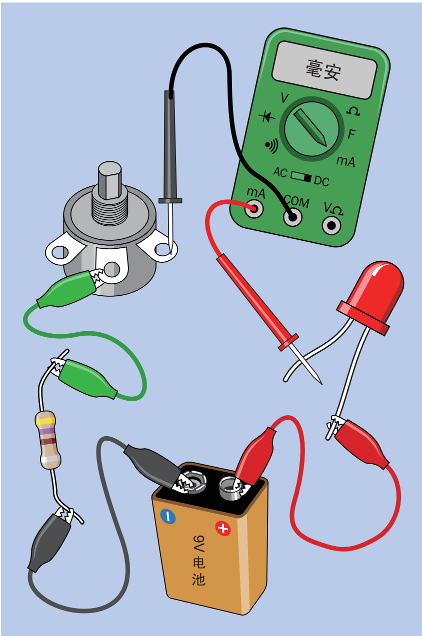


图 1-55　电流绕电路流通，流过万用表

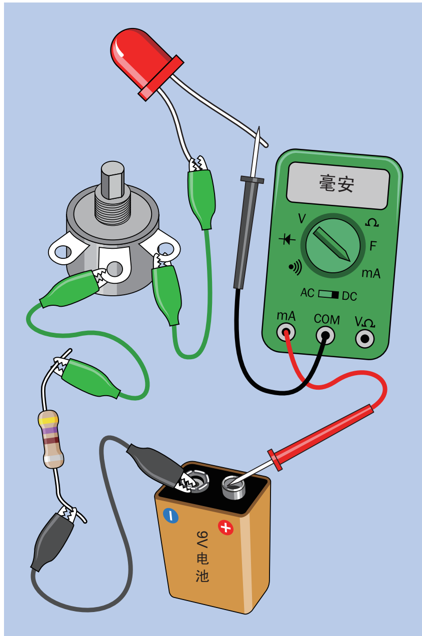


图 1-56　流过简单电路的电流在电路各处大小总是相同，无论测量位置如何

进行测量

现在是时候用一些数据阐明本次实验了。这能够帮助你建立起电子学中最基本的定律。

将 LED 从电路中移除，把万用表直接连入电池和电位器之间。移除 470 Ω 的电阻器，换上一个 1 kΩ 的电阻器（色带是棕-黑-红），如图 1-57 所示。现在，电路的电阻仅由 1 kΩ 电位器和 1 kΩ 电阻器提供。（万用表也有一些电阻，但是阻值很小，我们可以忽略它。导线和弹簧夹也有一些小小的电阻，但是阻值比万用表还要小。）

将电位器顺时针调到头，这样它的阻值就接近零。现在，电路中只有由电阻器提供的 1000 Ω 电阻。万用表显示的电流是多大呢？

将电位器调到一半，它提供的电阻约为 500 Ω。现在，电路中的总电阻约为 1500 Ω。万用表显示的电流又是多大呢？

将电位器逆时针调到头，这样它的全部阻值都连入电路，加上电阻器，总电阻为 2000 Ω。现在的电流是多大？

我的实验结果如下。你的结果也应该大致相同。

9 mA，总电阻 1 kΩ
6 mA，总电阻 1.5 kΩ
4.5 mA，总电阻 2 kΩ

你发现有趣的东西了吗？对于任何一行，左侧的数字与右侧的数字相乘结果总是 9。而 9 恰好就是电池的电压。

我们一共只测了三次，但是如果你用一组定值电阻进行更加细致的测试，我敢说结果依然相同。可以总结出下面这个公式：

电压 = 毫安 × 千欧

但是请稍等：1 kΩ 是 1000 欧姆，而 1 mA 是 1/1000 安培。因此，使用伏特、安培、欧姆这三个基本单位，公式看起来实际上是这样的：

电压 =（欧姆 ×1000）×（安培 /1000）

分子分母上的 1000 可以相消，这样我们就得到了：

电压 = 安培 × 欧姆

这个公式称为欧姆定律。它是最基本的电学定律。

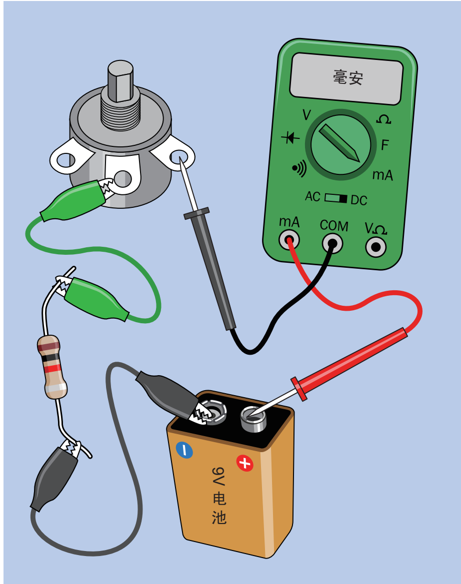


图 1-57　最后一次 LED 测试中不用 LED

基础知识：欧姆定律

欧姆定律的一般表达式是：

电压 = 安培 × 欧姆

通常简记为：

$V = I \times R$

I 代表电流，因为最初电流是通过电感系数（inductance）衡量的，电感系数指的是引起磁场效应的能力。或许用其他字母（例如 *C*）来代表电流更方便，但是要劝说大家改变这个习惯已经太晚了。你只需记住 *I* 指的是电流即可。

把字母左右移动，就能得到欧姆定律的变化形式：

$I = V/R$

$R = V/I$

应用公式时要确保单位一致。如果 V 的单位是伏特，I 的单位是安培，那么 R 的单位必须是欧姆。

如果电流的单位是毫安会怎么样？那么电流必须换为用安培表示。例如，大小为 30 mA 的电流在公式中必须写作 0.03 A（0.03 A = 30 mA）。如果有些困惑，就拿计算器把毫安数除以 1000 得到安培数吧。同样，把毫伏数除以 1000 可以得到伏特数。

为了降低犯错误的风险，可以使用实际单位记忆欧姆定律：

伏特 = 安培 × 欧姆

安培 = 伏特 ÷ 欧姆

欧姆 = 伏特 ÷ 安培

但是要记住一点。

> 伏特是简单电路中两点之间的**电压差**。欧姆是这两点之间的电阻值。安培是流过电路的电流。

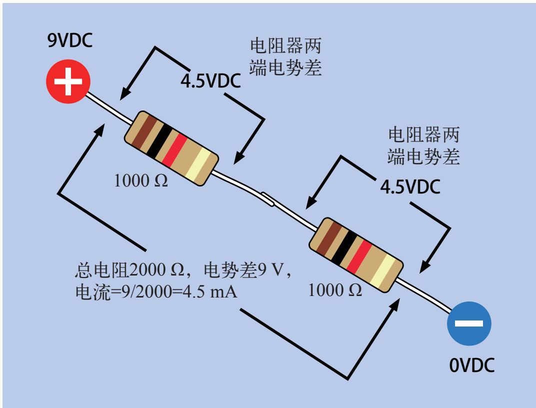


图 1-58　两个阻值相同的电阻器串联连接

基础知识：串联和并联

在实验电路中，电阻和电位器是**串联**连接的，这意味着电流要先通过一个元件，再通过另一个元件。备选方法就是把它们并排**并联**起来。

- 串联电阻器是一个接一个排布的。
- 并联电阻器是并排排布的。

将两个阻值相同的电阻器串联，总阻值会加倍，这是因为电流要接连通过两个阻碍。如图 1-58 所示。

将两个阻值相同的电阻器并联，总阻值会减半，因为电流有两条阻值相同的通路，而不是一条。如图 1-59 所示。

两幅图中，单位为**毫安**的电流都是用欧姆定律计算出来的。

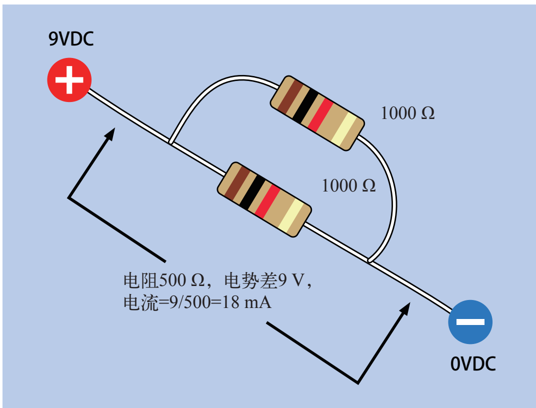


图 1-59　两个阻值相同的电阻并联连接

实际上，我们通常不把电阻器并联连接，但是经常把其他元件并联连接。例如，你房间内的所有灯泡都与总电源并联。因此，如果一直增加并联元件，电路中的电阻会减小，理解这一点很有用。同时，随着电流通路条数的增加，电路中的总电流会上升。

使用欧姆定律

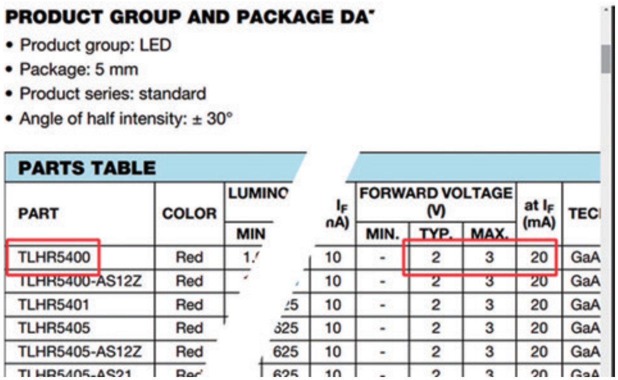
欧姆定律非常有用。例如，它可以准确地告诉你 LED 应该串联多大阻值的电阻器，使它既能得到足够的保护，又能发出尽可能明亮的光。

你要先查找制造商为 LED 制定的规格说明。这种信息很容易在数据表中找到，可以上网查询。假设你有一个威世（Vishay）半导体制造的 LED，你知道它的产品编号是 TLHR5400，因为在接收 LED 的邮包时，编号就印在标签上；你剪下标签，把它和 LED 放在一起。（至少这是你应该做完的事情。）

你需要做的就是在 Google 上查询产品编号和制造商名称：

```
Vishay tlhr5400
```

第一条搜索结果是 Vishay 维护的数据表。向下滚动鼠标，你就会发现需要的信息。图 1-60 中，我保留了屏幕截图的左侧和右侧。用红色在左侧圈出了元件的产品编号，在右侧圈出了两种类型的正向电压。“Typ”意为“标准”，而“Max”你肯定猜出来了，意为“最大”。因此，标准情况下，LED 应当在 2 V 电势差下工作。但是，“ I_F (mA)”又是什么意思呢？请记住，字母 I 用来代表通过电路的电流。字母 F 意为“正向”。因此，表格中的正向电压是在 20 mA 的正向电流下测得的，20 mA 是这种 LED 的建议电流值。



PRODUCT GROUP AND PACKAGE DA

- Product group: LED
- Package: 5 mm
- Product series: standard
- Angle of half intensity: ± 30°

PARTS TABLE

PART	COLOR	LUMINO MIN	I_F (mA)	FORWARD VOLTAGE (V) MIN.	TYP.	MAX.	at I_F (mA)	TEC
TLHR5400	Red	[illegible]	10	-	2	3	20	GaA
TLHR5400-AS12Z	Red	[illegible]	10	-	2	3	20	GaA
TLHR5401	Red	[illegible]	10	-	2	3	20	GaA
TLHR5405	Red	[illegible]	10	-	2	3	20	GaA
TLHR5405-AS12Z	Red	625	10	-	2	3	20	GaA

图 1-60　LED 数据表的屏幕截图

如果你的 LED 型号是 Kingbright 的 WP7113SGC，又该如何查找呢？这次，合适的数据表是 Google 搜索页面的第二条搜索，数据表的第二页列出了标准的 2.2 V 正向电压、2.5 V 最大电压、25 mA 最大正向电流。Kingbright 数据表的布局与 Vishay 数据表的布局不同，但信息找起来仍然比较容易。

让我们从 Vishay 的 LED 开始讲起。由于已知它在 2 V 电压、20 mA 电流下能够正常工作，欧姆定律可以告诉你其他的事情。

电阻应该取多大

图 1-61 所示的简单电路意在计算电阻的正确阻值。首先回忆一下我讲过的欧姆定律。

> 如果把电路中所有器件两端的电势差相加，它们的和应当与电池提供的电压相同。

电池电压为 9 V，我们需要 LED 上的电压为 2 V，因此电阻器必须承担 7 V 的压降。电流应该是多大呢？记得我前面提过的另一个定律吗？

> 简单电路中的电流处处相等。

因此，流过电阻器的电流和流过 LED 的电流相等。你的目标是获得 20 mA 的电流，但是欧姆定律要求所有的单位都匹配。如果单位是伏特和欧姆，就需要用安培表示电流。20 mA 是 20/1000 安培，即 0.02 安培。

现在你可以把已知量写下来，一般来说，这就是第一步：

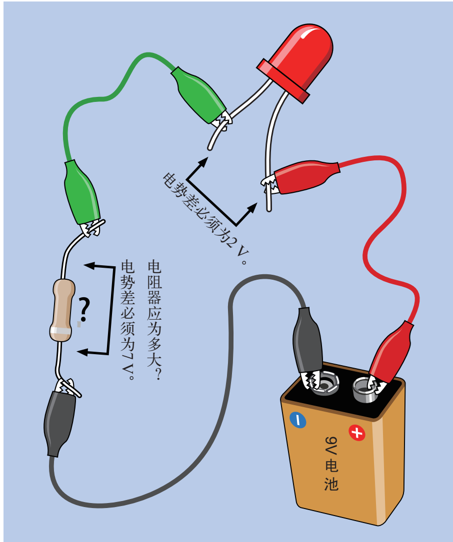


图 1-61　这个基本电路能让你算出电阻器的阻值

$V = 7$ V
$I = 0.02$ mA

应该使用欧姆定律的哪个公式呢？待求的未知量在公式左侧。应该使用这个公式：

$R = V/I$

现在将 V 和 I 的值代入公式，如下：

$R = 7/0.02\ \Omega$

后面将告诉你一个计算带小数点的数字的窍门，为了节约时间，用计算器算出答案：

$7/0.02 = 350\ \Omega$

这并不是电阻器的标准阻值，标准阻值是 330 Ω。要是你的 LED 更为灵敏，则可以使用更高的标准阻值，即 470 Ω。你还记得我在实验 3 中使用了 470 Ω 的电阻器吧，现在明白了：我进行了一番计算。

有些人容易犯这样的错误。计算串联电阻器的阻值时，他们用电源电压（本例中为 9 V）除以电流。这并不正确，因为电源电压加到了电阻**和** LED 两端。要求电阻器的阻值，就需要考虑电阻两端的电势差，此处为 7 V。

如果使用不同的电源，会发生什么？在后面的章节中，你将在几个实验里用到 5 V 的电源。这

将如何改变适合的电阻值呢？

LED 两端的电压仍为 2 V。电源电压为 5 V，因此电阻器上的压降应为 3 V。电流仍然相同，计算式如下：

```
R = 3/0.02
```

因此电阻值为 150 Ω。但是 LED 并不需要发出最亮的光，你使用的 LED 的额定电流可能也小于 20 mA。而且，如果电路采用电池供电，你可能会减少电能消耗，使电池寿命更长。考虑到这些，可以使用更高的标准阻值，即 220 Ω。

背景知识：导线发热

我提到过，导线的电阻非常低。是不是低到可以忽略不计呢？实际不是。如果有很大的电流流过导线，导线会发热，如同你在实验 2 中见过的短路 1.5 V 电池的情形。如果导线变热，你就可以确定有一部分电压被导线所拦截，使得连接到导线上的任何器件可用电压都降低。

你可以再次使用欧姆定律计算一些数据。

假设有一段很长的导线，阻值为 0.2 Ω。你想让 15 A 的电流通过这根导线，来带动一个耗能很高的器件。

先写下已知量：

```
R = 0.2 Ω（导线电阻）
I = 15 A（流过电路的电流）
```

想知道导线两端的压降 V，就要用到 V 在左侧的欧姆定律公式：

```
V = I × R
```

代入各个值：

```
V = 15 × 0.2 = 3 V
```

如果你使用的电源电压很高，那么这 3 V 并不重要，但是如果你用的是 12 V 的车用电池，这段导线将占去可用电压的四分之一。

现在你知道汽车上的接线为什么要相对粗一些了——为了尽量少浪费 12 V 电池的能量。

基础知识：小数

传奇英国政治家温斯顿 • 丘吉尔以抱怨“那些该死的点”而出名。他指的是小数点。因为丘吉尔当时是英国财政大臣，要监督政府的所有支出，他在小数点上遇到的困难确实有些麻烦。尽管如此，他还是以历史悠久的英国方式把这个问题应付了过去，你也可以的。

假设你的待除式里有小数点，把分子和分母上的小数点移动相同的位数，计算就会更简单。因此，当你想计算 LED 的串联电阻值 7/0.02 时，可以把小数点向右移两位。

```
7/0.02 = 700/2
```

这就简单多了。注意，把小数点右移到数字之后，每移出一位就要补一个零。把 7.0 中的小数点向右移两位，就得到了 700。

待乘式里的小数点又应该如何处理呢？例如，用 0.03 乘以 0.002。现在是乘法不是除法，要把小数点反方向移动。如下：

$0.03 \times 0.002 = 3 \times 0.000\,02$

结果是 0.000 06。当然，如果你觉得还是不清楚，可以使用计算器。但是有时候用纸笔甚至心算会更快一些。

理论知识：舌尖上的数学

我要回到前一个实验中提出的问题：为什么你的舌头没有变热？

你已经学习了欧姆定律，可以用数字计算出答案了。假设电池提供额定的 9 V 电压，你的舌头电阻为 50 kΩ。像往常一样，写下已知量：

$V = 9$ V
$R = 50\,000\ \Omega$

要求出电流 I，使用 I 在左侧的欧姆定律公式：

$I = V/R$

代入数字：

$I = 9/50\,000 = 0.000\,18$ A

将小数点右移三位，把安培转换为毫安：

$I = 0.18$ mA

这个电流很小，不会产生很多热量。

短路电池的情况又怎样呢？多大的电流能使导线发热？假设导线电阻为 0.1 Ω（可能更小一些，但是我要从估计值 0.1 入手）。写下已知量：

$V = 1.5$ V
$R = 0.1\ \Omega$

为了求出电流 I，使用此公式：

$I = V/R$

代入数字：

$I = 1.5/0.1 = 15\ A$

这个结果是流过你舌头的电流的近 100 000 倍，它在细导线中产生大量的热。

房间取暖器或大功率电动工具，例如桌锯，可能需要 15 A 的工作电流。你可能想知道小小的 AA 电池是不是真的能提供那么大的电流。答案是……我也不确定。我无法用万用表测量这个电流，即使我把表笔插入标为 10 A 的大电流插孔，15 A 的电流也会烧毁万用表的保险丝。但是我确实用 10 A 的保险丝（而非 3A 保险丝）尝试了这个实验，而且 10 A 保险丝没有损坏。

这是为什么呢？欧姆定律得出的电流应当是 15 A，但由于某些原因，实际电流比 15 A 要小。也许电池架上的导线电阻实际大于 0.1 Ω？不，我觉得很可能要更低。那么，到底是什么使电流比欧姆定律计算得出的要小呢？

答案是，日常生活中的每一件物品都有一些电阻，**包括电池**。要记住，电池是电路中的有源部分。你还记得吧，电池短路时变得和导线一样热。很显然，电池有一定的**内阻**。在处理单位为毫安的小电流时，可以忽略电池内阻，但是对于较大的电流，电池内阻实际也包含在总电阻内。

这就是我警告你不要使用大电池（尤其是车用电池）的原因。较大的电池内阻要低得多，流过的电流就大得多，可以产生爆炸性的热量。车用电池那样设计，是为了在启动发动机时提供数百安培的电流，这么大的电流足够熔化导线，引发严重的烧毁事故。实际上，利用车用电池可以焊接金属。

锂电池的内阻也很低，短路时也十分危险。下面是一条关键信息：

> 大电流与高电压造成危险的方式并不相同，但是大电流也很危险。

背景知识：瓦特

目前为止，我还没有提及大家都很熟悉的一个单位：瓦特。

瓦特是功率的单位，在一段时间内一直有功率消耗，该功率就做了功。工程师可能会说，功是人、动物或机器推动某物克服机械阻力而做出的。比如车在平直路面上行驶（克服摩擦和空气阻力），还有人上楼（克服重力）。

1 瓦特的功率 1 秒钟做的功是 1 焦耳，通常用字母 J 表示。如果用字母 P 表示功率，则：

$J = P \times s$

也可以把公式倒过来写：

$P = J/s$

电子穿过电路时，要克服一种阻力，因此这也是在做功。

瓦特的电学定义很简单：

瓦特 = 伏特 × 安培

以惯用的指定单位 W 代表瓦特，以下三个公式都代表同样的含义：

$W = V \times I$

$V = W/I$

$I = W/V$

毫瓦（mW）、千瓦（kW）和兆瓦（MW）三个单位通常在不同的情况下使用——兆瓦通常用于重型设备，例如发电站的发电机。注意，不要将毫瓦的简写 mW 中的小写 m 与兆瓦的简写 MW 中的大写 M 相混淆。毫瓦、瓦特和千瓦之间的转换关系表如图 1-62 所示。

毫瓦	瓦特	千瓦
1 mW	0.001 W	0.000 001 kW
10 mW	0.01 W	0.000 01 kW
100 mW	0.1 W	0.0001 kW
1000 mW	1 W	0.001 kW
10 000 mW	10 W	0.01 kW
100 000 mW	100 W	0.1 kW
1000 000 mW	1000 W	1 kW

图 1-62　最常见的瓦特倍数转换表

老式的白炽灯泡功率用瓦特标记，立体音响系统的功率也用瓦特标记。瓦特得名于蒸汽机的发明者詹姆斯·瓦特（James Watt）。顺便说一句，瓦特可以与马力互相转化。

电阻器的额定功率通常为 1/4 W、1/2 W、1 W 以及更高。对于本书中所有的实验，你都可以使用 1/4 W 的电阻器。我是怎么知道的呢？

回到第一个 LED 电路，使用 9 V 电池供电。你需要电阻在 20 mA 的电流下把电压降低 7 V。那么，电阻的功率会是多少瓦特？

写下已知量：

V = 7 V（电阻两端的电势差）

I = 20 mA = 0.02 A

求 W，使用此形式的公式：

$W = V \times I$

代入数据：

$W = 7 \times 0.02 = 0.14$ W

这就是电阻器消耗的功率。

因为 1/4 W 就是 0.25 W，所以额定功率 1/4 W 的电阻在 0.14 W 功率下工作没有问题。实际上，用 1/8 W 的电阻也差不多，但是在将来的实验中，我们会用到能在 1/4 W 功率下工作的电阻，而且

使用额定功率高一些的电阻也不是什么错误，它们只是稍微贵一点、大一点罢了。

背景知识：瓦特数（功率）的来源

詹姆斯·瓦特（肖像见图 1-63），1736 年出生于苏格兰，蒸汽机的发明者。他在格拉斯哥大学建立了一家小车间。他在车间里努力完善蒸汽驱动汽缸活塞的高效率设计。由于的经济问题以及当时落后的金属加工技术，瓦特的设计到 1776 年才付诸实际应用。

尽管获取专利有一些困难（在那个时代，专利只能通过议会的法案授予），但瓦特和他的商业伙伴最终还是通过发明获利良多。虽然瓦特在世的年代比电学先驱们还要早，但是在 1889 年（他去世 70 年之后），他的名字成为了电功率的基本单位，可以用安培乘以伏特来定义。

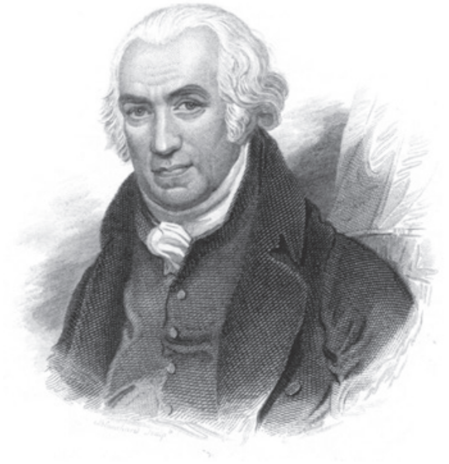


图 1-63 詹姆斯·瓦特对蒸汽机的改进开启了工业革命。他死后，为表示尊敬，人们把他的名字作为电学中功率的基本单位

清理和回收

损坏的 LED 可以扔掉了，其他所有物品都可以继续使用。

实验 5：制作电池

很久以前，在网络还没出现的时候，孩子们的生活十足乏味，他们自娱自乐，在厨房的桌子上将钉子和分币插入柠檬中制作电池，做这一类的实验。你可能觉得难以置信，但这是真的。

现代 LED 只要几毫安的电流通过就能发光，古老的柠檬电池实验则更加有趣。如果你从未尝试过这个实验，现在正是好时机。

需要的物品

- ❒ 万用表
- ❒ 柠檬 2 个（1 个柠檬的鲜榨纯果汁也可以）
- ❒ 镀铜的硬币（例如美分硬币）4 枚
- ❒ 五金店购买的 1 英寸（或更大）镀锌钢支架 4 个
- ❒ 两端带弹簧夹的测试引线 5 条
- ❒ 低电流 LED 1 个（参考本章购物清单中，关于通用 LED 和低电流 LED 的差异的提示）

预备工作

电池是一种**电化学**装置，这意味着化学反应可以产生电能。自然，只有使用了正确的化学物质，才会产生电能。我要使用的物质是铜、锌和柠檬汁。

柠檬汁的购买应该不是问题，柠檬很便宜。你也可以买一小瓶浓缩柠檬汁，就是黄色塑料瓶包装的那种。两种方法都可以。

硬币不再是铜铸的了，但是表面仍然镀有薄薄的一层铜，这也足够了。你只需确保自己的硬币够新、够亮。如果表面的铜氧化了，硬币就会呈暗棕色，实验也无法正常进行。

锌有点不好找。你需要一块镀锌的金属，即表面覆盖有一层锌以防止锈蚀。你那里的五金店里应该能买到小型的镀锌钢支架，它们也不贵。每边大约 1 英寸长的支架就很好。

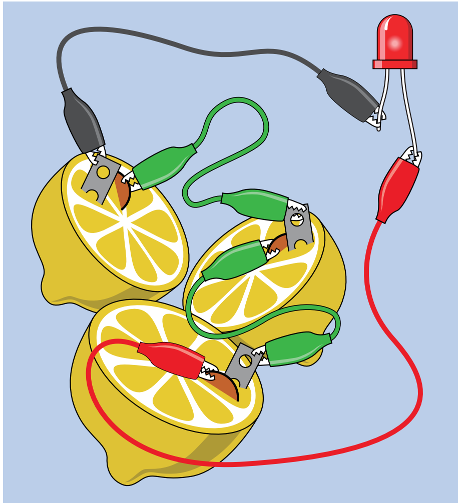


图 1-64　三个柠檬串联成的电池产生的电压足可以点亮一个低电流 LED

柠檬实验：第一部分

把柠檬切成两半，在中间插入一枚硬币。在尽可能靠近硬币的地方插入镀锌的支架（但是不要碰到它）。现在设置万用表，量程 2 V 直流，用一根探针压紧硬币，另一根探针压紧支架。你将发现万用表检测到了 0.8 V~1 V 的电压。

为了给一个标准的 LED 供电，你需要更高的电压。怎么获取呢？把电池串联，也就是说，把更多的柠檬连在一起！你要用测试引线把柠檬相互连接，如图 1-64 所示。注意，每根引线都把支架和硬币连在一起。不要将硬币和硬币相连，也不要将支架和支架相连。

如果你小心设置了各种材料，保持硬币和支架之间的距离较近但不互相接触，那么把三个柠檬汁电池串联起来就能把 LED 点亮了。

另一种方法是使用分成了几个小部分的小零件盒，如图 1-65 所示。当所有材料都准备好后，挤入一些浓缩柠檬汁。醋或柚子汁也会有效果。



图 1-65　鲜榨柠檬汁或瓶装柠檬汁都会产生可靠的结果，虽然实验设备看起来很一般。这是一个零件盒，被改造成了四节柠檬汁电池

我决定用四块电池组成柠檬汁电池，因为 LED 多少会使电压下降一些，而且电池提供的电流也不足以损坏 LED。图中的装置立即就开始工作了。

理论知识：电的本质

为了理解柠檬汁电池为何能够工作，你需要首先了解与原子有关的一些基本知识。每个原子的中心都有一个原子核，其中包含名为质子的粒子，质子带正电。原子核被电子包围，电子带负电。

破坏原子核需要很高的能量，同时也会释放大量能量。核爆炸中发生的现象由此而来。但是花费很少的能量就可以劝说几个电子离开原子（或加入原子）。例如，当锌与酸发生化学反应时，就会放出电子。

如果镀锌的部分没有与任何物品连接，反应很快就会停止，因为电极上积累的电子无处可去。电子之间有相互排斥的作用力，你可以把它们想象成一群互相敌对的人，每个人都想让别人离开，并且拒绝新成员加入，如图 1-66 所示。

现在考虑一下这种情况：锌电极上有过剩的电子，而另一个电极由不同材料制成，具有电子能够占领的“空穴”，用一根导线将这两个电极连接起来，会发生什么？电子能从一个原子跳到下一个原子，从而很容易通过导线。这条通路一开启，电子间相互的斥力就使得电子以最快的速度彼此远离，前往它们的新家。这就是电流形成的过程。如图 1-67 所示。

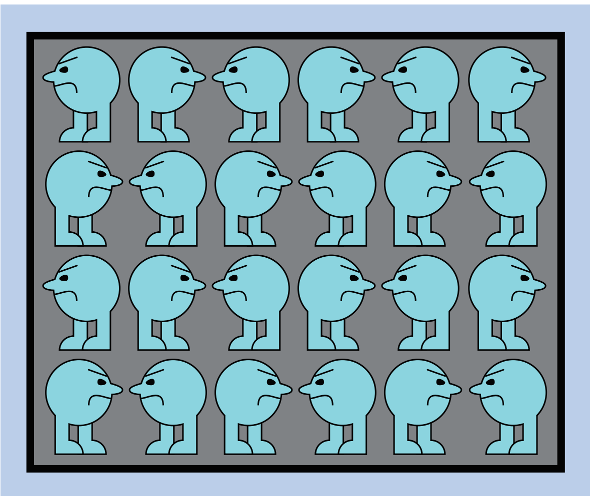


图 1-66　电极上的电子态度很坏，它们互相排斥

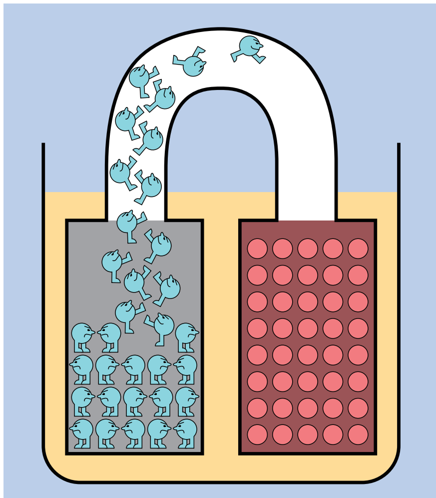


图 1-67　电子从锌电极上逃离，前往铜电极

锌电极上的电子数量已经减少了，所以锌–酸反应可以继续，用新的电子代替流失的电子。这些

新的电子很快又模仿它们的前辈，试图沿着导线跑开而彼此分离。它们在一股推力下移动，我们可以把它们转移到 LED 中去，它们会释放一些能量，点亮 LED。

这一过程将持续到锌-酸反应停止，这通常是因为产生了化合物层，例如锌的氧化物。锌的氧化物不与酸反应，也就阻止了下层的锌与酸反应。（所以，当你把锌电极从酸性电解质中拿出来时，会看到锌电极变得乌黑。）

这番描述也适用于原电池。也就是说，一旦在原电池的两极之间建立连接，使电子可以从一个电极输送到另一个电极，它就将发出电来。原电池产生的电流大小取决于内部发生化学反应释放电子的速度。电极中的金属原料在化学反应中全部用完后，电池就无法继续产生任何电能，而变成了死电池。给原电池充电很困难，因为化学反应不容易反向进行，而且电极也可能已经被氧化了。

在可充电电池（也称蓄电池）中，电极和电解液经过了巧妙的选择，化学反应比较容易逆转。

背景知识：正电与负电

我告诉过你，电是电子流，带负电荷。既然如此，我为什么在已经进行过的实验里一直说电流从电池的正极流向负极呢？

这个故事来源于电学研究历史上的一件尴尬事件。本杰明 • 富兰克林试图通过研究雷雨天的雷电现象来理解电流的性质，在这个过程中，他相信自己观测到了一种“电流体”从正流向负。他于 1747 年提出了这个概念。

实际上，很遗憾，富兰克林犯了一个错误，这个错误在 1897 年物理学家约瑟夫 • 汤姆孙宣布发现电子之前，一直没有得到纠正。电实际上是从一个具有较多负电荷的区域流向某个“不那么负”的地方，即“更加正”的地方。在电池中，电子从负极出发，流向正极。

你也许会认为，以上事实公开以后，人人都应该放弃富兰克林的电流从正极流向负极的观点。但是人们 150 年来都是这样思考的。而且，当电子通过一条导线时，你仍然可以认为有等量的正电荷沿着相反的方向流动。电子离开原位时，会带走一个小小的负电荷，因此原来的位置就会变得更正一些。当电子到达它的目的地时，它的负电荷使目的地变得不那么正。这跟一个假想的正电荷沿着相反的方向移动时发生的事情是完全一样的。不仅如此，所有描述电的行为的数学公式应用假想的正电荷流动时仍然成立。

考虑到传统，也为了方便，我们仍保留富兰克林的电流从正往负流的错误观念，因为这其实并没有导致什么差别。

在表示二极管、晶体管等元件的符号中，你会发现一些箭头，它们提醒你这些元件应该沿着哪个方向放置——这些箭头都是从正极指向负极的，尽管这根本不是电子流动的实际方向。

富兰克林研究闪电时，他认为电荷从带正电的区域（天上的云层）移动到带负电的区域（地球）。确实，云层显正电性，但是这意味着实际上闪电的电子流是从地面流向天空的。“遭到雷击”

的人很可能是被自己发出的电子所伤害，而不是由于自己接收了电子，如图 1-68 所示，这才是正确的观点。

理论知识：基本测量

现在，我要回溯一下你一般会在电子学教程开头看到的各种定义。

电量是将每个电子的电荷相加得到的，其基本单位是库仑，1 库仑等于 6241 509 629 152 650 000 个电子的电荷。

如果你知道每秒有多少个电子通过一段导线，就可以计算出电流，单位是安培。

1 安培 = 1 库仑 / 秒（约 6.24×1018 个电子 / 秒）

即使你能看见通电导线的内部，电子也远小于可见光的波长。你无法观测它们，而且电子的数目太多，移动速度太快。但是，我们可以用间接方法检测电子的运动。例如，电子的运动会产生电磁力。更多的电子会产生更大的电磁力，这个力是可以测量的。我们可以根据它来计算电流。电力公司在你家中安装的万用表就是利用这个原理来工作的。

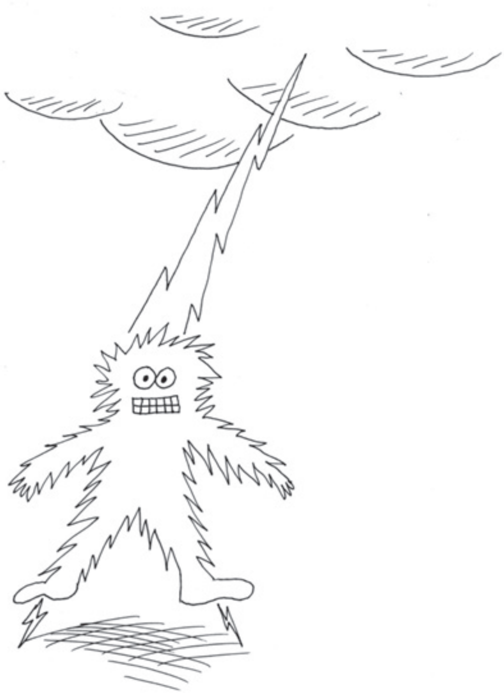


图 1-68　在某些天气情况下，雷击的电子流可能来自地面，通过你的脚，流出头顶，再上升到云层中。本杰明 • 富兰克林一定会很惊讶

推动电子通过导体的力就是电压，它产生电流，进而产生热，正如你在短路电池时所看到的那样。（如果你的导线电阻为零，通过它的电流就不会产生任何热量。）我们可以直接使用这个热量（电炉就是如此），也可以用其他方式利用电能，例如运转电动机。无论哪种方式，都是从电子中提取能量来做某种功。

1 V 可以定义为产生 1 A 电流来做 1 W 功所需要的压力。前面曾经定义过瓦特 = 伏特 × 安培，但这个定义实际来源于另一个公式，即：

1 V = 1 W/A

这个表述方式更有意义，因为瓦特可以用非电学术语来定义。如果你感兴趣，我们可以像下文这样，倒着往回推导国际单位制：

1 W = 1 J/s

1 W 等于在 1 N 的力作用下前进 1 m 所需的功。

1 N 等于每秒钟让 1 kg 的物体加速 1 m/s 所需要的力。

在此基础上，电学单位都可以用质量、时间以及电子的电荷等物理量来确定。

实际应用

从实用的角度看，对电的直观理解比理论更加有用。我喜欢用水作类比，它已经在电学启蒙课程中应用了数十年。

根据图 1-31 的类比，水从水箱中流出的速度可以看做安培数，而水箱中的水面高度产生了压力，可以与电压类比，孔的大小相当于电阻。

以上场景中，功率在哪里呢？假设你放置一个小水轮，让孔里流出来的水冲击这个小水轮，如图 1-69 所示。可以让这个水轮带上机械装置。现在水流已经在做功了。（记住，功率是做功速度的量度。）

这看起来也许有点像无中生有，没有往系统中加入任何能量，却从水轮中抽取了功。但请注意，水箱中的水位在下降。只要我加入几个助手，把废水搬运回水箱的顶部，就能明显看出，必须输入功才能得到功。如图 1-70 所示。

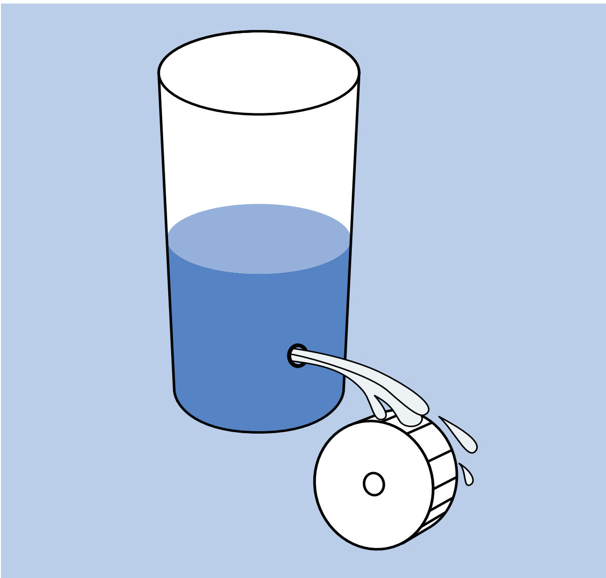


图 1-69　如果水轮从水流中抽取能量，水流就做了功，可以用一段时间的功率表示

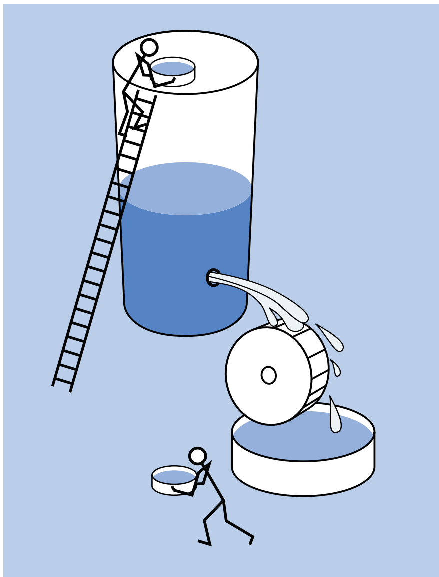


图 1-70　为了继续让系统做功，需要向系统中输入功

与之类似，电池似乎也只是发出功率而没有注入任何功率，但是其中的化学反应正在将纯金属转化成金属化合物，我们正是由这种状态改变从电池中获取功率的。如果是可充电电池，我们必须往回输入功率，使化学反应反向进行。

回到水箱的例子，假定我们无法从其中得到足够的功率来转动水轮。那么一种方案就是上升水面的高度，增大水的压力，如图 1-71 所示。

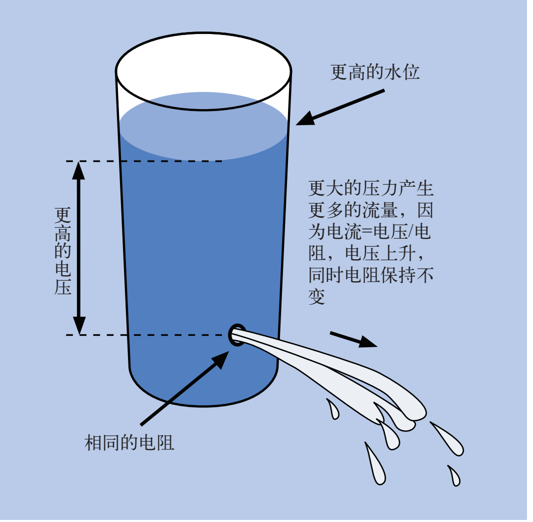


图 1-71　可用功的总量会随着水压变大而增加

这相当于把两块电池首尾相连，正极接负极串联（就是我在柠檬电池实验时建议的连接方法）。两节电池串联会使电压加倍，如图 1-72 所示。只要电路中的阻值保持不变，更大的电压就会产生更多的电流，因为电流 = 电压 / 电阻。

回到水箱的例子，如果我们想让驱动水轮的时间加倍，而水箱的容量已经用尽，怎么办？也许应该再造一个水箱，让水流从同一个孔流出。同样，如果将两块电池并排并联连接，电压是相同的，但是电池的使用时间会延长一倍。或者，这两块电池能比一块电池提供的电流更大。如图 1-73 所示。

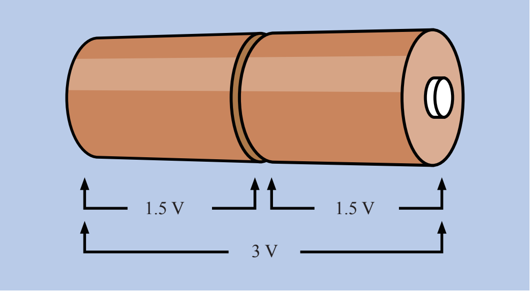


图 1-72　两块电池串联提供的电压是一块电池的两倍，只要它们的电量都很满

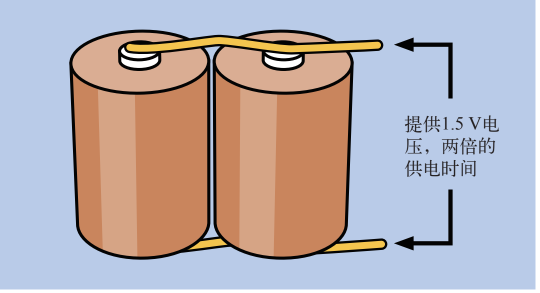


图 1-73　用并联的电池给同样的负载供电，供电时间会是原来的两倍。或者，它们可以提供两倍于单块电池的电流

总结一下。

- 两块电池串联，电压是原来的两倍。
- 两块电池并联可以在电流不变的情况下让使用时间加倍，或者在相同使用时间下让电流增大一倍。

好，理论已经够用了。第 2 章，我会再介绍一些实验，它们建立在电学知识基础上，将逐步呈现一些有趣又有用的小装置。

清理和回收

浸在柠檬或柠檬汁里的硬件可能已经变色了，但是还可以重复使用。考虑到柠檬中可能存留了一些锌离子，建议你还是不要把柠檬吃下去。

第 2 章 开关

2

本章包括实验 6 到实验 11，探索了看似简单的开关主题——我所说的开关不只是手动控制的开关，还包括用一股电流开关或控制另一股电流。开关的原理非常重要，所有的数字设备都要用到它。

如今，开关动作主要是由晶体管执行的。我会详细介绍晶体管，但是在这之前，我要铺垫一下，通过介绍继电器来阐明开关的概念。继电器比较容易理解，因为你可以看到过程。而在讲解继电器之前，我会展示手动开关是如何证明后面的一些概念的。因此，本章的顺序将是开关——继电器——晶体管。

本章我还要介绍电容，因为在电路中，电容几乎和电阻同等重要。

购物清单

和第 1 章一样，在购买工具和设备时，在准备购物清单的时候，请参考第 6 章的购买工具和设备一节。如果想买元件和配件套装，请参考套装一节。如果你喜欢从在线商店自己购买元件和配件，请参考元件一节。

必要工具：小螺丝刀

图 2-1 展示了一套 Stanley 生产的小螺丝刀（产品编号 66-052）。你家里已有的螺丝刀对于元件上的大多数小螺丝都太大了。

你也可以买与图 2-1 相似而更便宜的螺丝刀套装，但我认为名牌螺丝刀的钢材质量要更好一些。



图 2-1　小螺丝刀，有扁平刀片，也有十字刀片。白线的间隔为 1 英寸

必要工具：小型尖嘴钳

你要用到的尖嘴钳从头到尾不长于 5 英寸。你要用这些钳子精确地弯曲导线，或者从手指难以伸入的地方捡起小部件。对于这些操作，我认为多花钱购买质量好的工具并没有太多益处，所以请你放心购买便宜的钳子，比如图 2-2 展示的这一种。这些钳子的手柄上装有弹簧，有的人不太喜欢。如果你还有一把钳子，那么可以把弹簧拆下来。



图 2-2　电子学工作适合的钳子应该不长于 5 英寸

可选工具：尖嘴钳

它们看起来像小型尖嘴钳，但是有非常精确、尖锐的钳口。我喜欢用它们夹取面包板上密集摆放的元件。尖嘴钳的最佳来源是专门研究手工艺品（例如珠编）的网站或材料商店。但是要小心，不要买圆头的珠编钳子用来弯曲导线。为了达到我们的目的，钳口的内侧应当是平坦的，如图 2-3 所示。

必要工具：剪线钳

钳子接合点附近通常有切削刃，可以用来剪导线。但是，一段导线通常连接着其他东西，用钳子是够不到的。这时你就要用到图 2-4 所示的剪线钳。它们的长度也不应超过 5 英寸。只要剪的是又细又软的铜导线，就不需要买质量太高的钳子。



图 2-3　尖嘴钳能够在小尺寸范围内非常精确地工作



图 2-4　剪线钳应该不长于 5 英寸

可选工具：平口钳

图 2-5 所示的平口钳与剪线钳很相似，可以胜任同样的工作，但是它们更薄、更小，能够更好地进入狭小的空间。不过它们不太耐用。是选用平切钳还是剪线钳，取决于个人喜好。我个人比较喜欢剪线钳。

必要工具：剥线钳

你要使用的导线外部会包裹有塑料绝缘层。剥线钳特别设计用来剥除导线上一段短短的绝缘层，露出里面的导体。“有男子气概的”业余爱好者可能宣称他们不需要任何工具就能剥线，但是我门牙内侧缺损的两个角证明用牙齿剥线真的是一个坏主意（见图 2-6）。



图 2-5　相比剪线钳，平口钳可以进入更狭小的空间

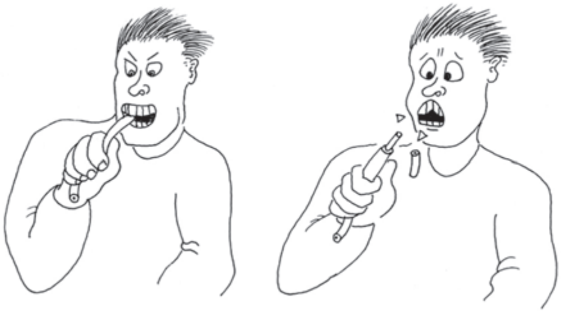


图 2-6　很着急？找不到剥线钳了？这诱惑显而易见，但这不是一个好主意

另一个选择是使用剪线钳，如图 2-7 所示。用一只手握住导线，用另一只手轻轻地合拢钳子的上下颚，然后双手拉开。但是，这技巧需要训练。有时，钳子会什么都没有剪断就滑开，而有时会把导线剪断。

多花几块钱买一把剥线钳，会使工作容易得多。

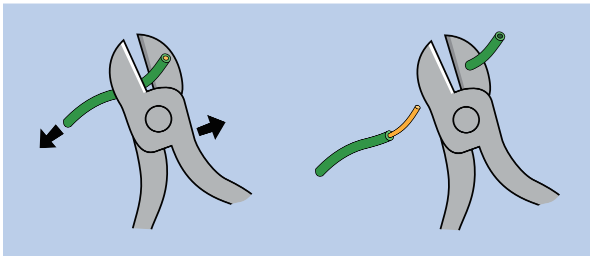


图 2-7　如何利用剪线钳剥除绝缘层（剥线钳用起来更容易）

本书的第 1 版包含了购买所自动剥线钳的方案，它可以用单手操作。很遗憾，它们比其他类型的剥线钳要贵得多，而且很多品牌的钳子并不能很好地处理本书中所有电路都使用的 22 线规连接线。因此，我不再推荐它们。



图 2-8　推荐的剥线钳用于处理 20 线规至 30 线规的导线

图 2-8 所示类型的工具有很多生产商。有的品牌有成角度的手柄，有的手柄是笔直的，而有的手柄是弯曲的。我觉得这没有什么关系。它们的工作方式都相同：把导线放入大小合适的孔中，合拢钳子，剥下绝缘层。

尽管剥线钳适合尺寸正确的导线，你也一定要小心操作。

线规是对导体粗细的一种度量。数字越大，表示导线越细。恰巧，对我们的目的而言，20 线规的导线有点太粗了，而 24 线规的导线有点太细了。最佳的选择是 22 线规，如果你买到专为 22 线规校准的工具，工作起来就会容易得多。如图 2-8 所示，20 至 30 线规之间有一个小孔是为 22 线规设计的。这就是合适的工具。

必要工具：面包板

面包板实验 8 之前不会用到，但是此处我要简单介绍一下它。面包板是一块小塑料板，上面以 0.1 英寸的间距穿有小孔。你要把元件和导线插入小孔中。塑料层的下面有导体，它们连接着一排排小孔。

比起你目前为止使用的测试引线，面包板能让元件更整齐地连接到一起。而且，与焊接元件相比，使用面包板连接更为简便，还可以拆卸。

面包板的正确名称是无焊面包板，有时也叫作原型板。

面包板的品牌或来源并不重要。但是你应当注意，要购买的面包板应该与我在本书中一直使用的结构相同。你有三个选择方案，其中只有一个是正确的：

面包板选项 1：迷你面包板，如图 2-9 所示。它的卖点通常是“适合 Arduino”，对我们的目的而言，它的孔数不够，所以不要买这种面包板。

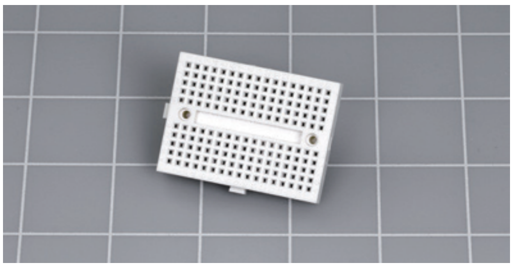


图 2-9　迷你面包板对于本书中的许多实验来说不够大

面包板选项 2：单总线面包板，如图 2-10 所示。“总线”指一长排孔，在几排较短的有编号的孔旁边，照片中用红色圈出了轮廓。这就是你需要的面包板。检查并确认一下你要购买的产品的照片。而且，要注意面包板上应该有 60 排小孔和 700 个连接点。如果你要自己购买，请在亚马逊或 eBay 上搜索：

```
无焊面包板 700
```

如果你喜欢，也可以用双总线面包板，忽略多出来的小孔就好。

面包板选项 3：双总线面包板，如图 2-11 所示。它的两侧每边都有两长排孔，即双总线，在照片中用红色圈出了轮廓。我在本书的第 1 版中使用了这种面包板，因为这样更加方便。后来，我发现人们在第一次使用它时很容易出现连线错误，所以我再也不推荐使用双总线面包板了。

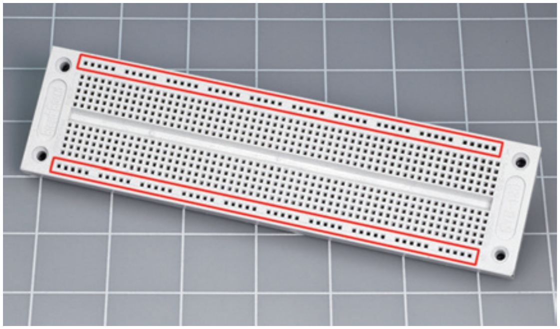


图 2-10　单总线面包板在两侧各有一长排小孔

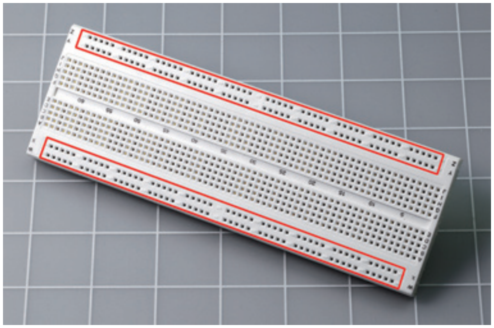


图 2-11　双总线面包板有四长排小孔，在照片中用红色圈出了轮廓。我不再推荐使用这种面包板了

既然我已经确定了推荐使用的面包板，那么你需要买多少块呢？我以前常说"一块就够了"，因为可以重复利用。但是它们的价格已经便宜了很多，我觉得你可以买两三块。这样，你就可以在不拆除旧电路的情况下搭建新电路了。

耗材

如果购买包含各种元件和配件的套装，请参考第 6 章套装一节。在购买自己的配件时，请参考耗材一节。

必要工具：连接线

面包板上连接元件的导线通常叫作连接线，但是它有时也会出现在散装电线的一般分类下。不论如何，它必须拥有实心线芯（无绞合），而且尺寸必须为 22 线规。

通常，连接线绕在塑料轴上出售，长度为 25 英尺和 100 英尺，如图 2-12 所示。



图 2-12　长度为 25 英尺或 100 英尺连接线

买一轴 100 英尺的连接线，每英尺线的价格会便宜一些，但我还是建议你购买每卷短一些的线，而绝缘层至少

要有三种不同颜色。这样做是因为，导线的颜色可以帮助你从搭建好的电路中找出错误。红色和蓝色的线可以分别用来连接电源的正极和负极，另一种颜色用于其他连接。

绝缘层剥除后，露出一段实芯导体，如图 2-13 所示。将图 2-14 中的绞线与导线芯相比较一下。绞线也有一些用途，我一会儿就会讲到。如果你试着把它塞进面包板上的小孔里，很快就会产生挫败感。你确实需要用实芯线。

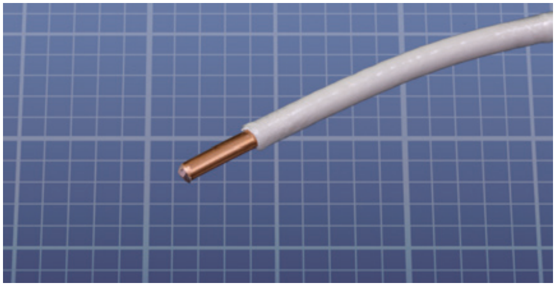


图 2-13　在塑料绝缘层内部，应该有一股实芯导线芯

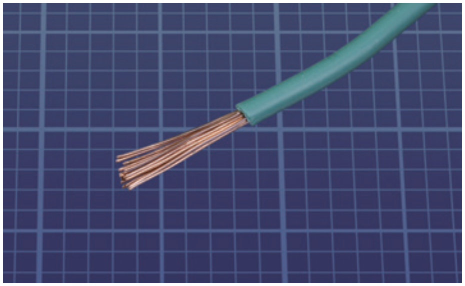


图 2-14　对于某些特定的目的（正文中有描述），绞线是一个很实用的选择

我在前文强调要使用为 22 线规导线特制的剥线钳。现在我还要强调，导线的尺寸应为 22 线规，不可以是 20 线规，也不可以是 24 线规。你会发现，24 线规的导线在面包板上插接不紧，可能会造成不可靠连接。20 线规的导线又有点太粗了。你若试着把它插进面包板里，它可能会弯曲，而不是进入正确的位置。如果你用力把它插进了面包板，拔出来就会很困难。

有的铜导线在剥除绝缘层后，会露出银色的涂层，据说是“镀锡”的。其他的导线只是普通的铜芯导线，我也不知道哪种要更好一些。

你需要多长的导线呢？组装本书中的电路，每种颜色 25 英尺已经非常足够。但是，实验 26、实验 28 和实验 29 需要你自己制作线圈来探索电和磁之间的关系，并组装自己的晶体收音机。如果你想做这些实验（我认为很值得一试），就需要长 200 英尺的导线。这就是你自己的选择了，本书中的所有套装都没有这么长的导线。请参考第 6 章配件一节获取关于购买导线的信息。

跨接线

剪下一段导线，剥除至少 1/4 英寸但不多于 3/8 英寸的绝缘层，将两端向下弯曲，把它们插入面包板的孔里，你就做成了一段跨接线。它可以跳过面包板上的一些中间点形成连接。这种跨接线可以搭出整洁的电路，你可以比较容易地找出连接错误。

问题在于，剥除绝缘层，把导线弯成直角等工作很乏味。即使使用了正确的工具也是如此。因此，你可能会倾向于购买预切割导线，它们已经做成了跨接线。图 2-15 所示为一盒种类各异的跨接

线。若需要关于寻找这种线盒的指南，请参考第 6 章耗材一节。

我自己曾经用过预切割导线，但是后来放弃了，因为各段导线的颜色是根据长度而非功能确定的。红色导线都是 0.2 英寸长，黄色导线都是 0.3 英寸长，诸如此类。

我希望导线的颜色反映它们在电路中的功能。因此，红色导线总应连接到电源正极，无论它们的长度是多少。

如此一来，唯一的解决方法就是自己剪切导线，这也正是我的方法。如果你选择使用预切割导线，那当然可以，但是除了颜色容易混淆之外，它们的价格还更贵。



图 2-15　一盒跨接线，已经剥除绝缘层并弯曲好，用于面包板

关于跨接线，我还有一点需要澄清。很多人都喜欢用另一种跨接线，它的两端各有一个小插头，正好能够插入面包板上的小孔中。这些“带插头的跨接线”成捆销售，而且可能是你上网搜到的第一件商品。

因为它们弹性好，而且长度通常都是 3 英寸左右，所以你可以用它们在面包板电路上进行所有类型的连接。它们可以重复使用，大约是最简单、最快捷、最便宜的选择方案。

目前为止很顺利，但是如果你犯了个错误，发现错误就很困难了。图 2-16 展示了本书未收录的一个应用的小电路，使用两端有插头的软跨接线连接。图 2-17 展示了用实芯 22 线规导线手工切割出的跨接线连接成的同一个电路。这两个电路都有一处错误。在手工切割导线连接的电路上，我在几秒钟内就可以发现错误，而在软跨接线连接的电路中，我需要找上好一会儿，还可能要使用万用表。

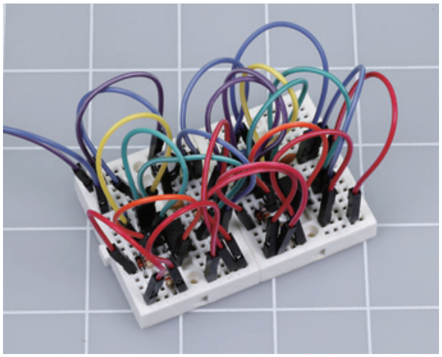


图 2-16　用两端有插头的软跨接线在两块迷你面包板上搭接成的电路

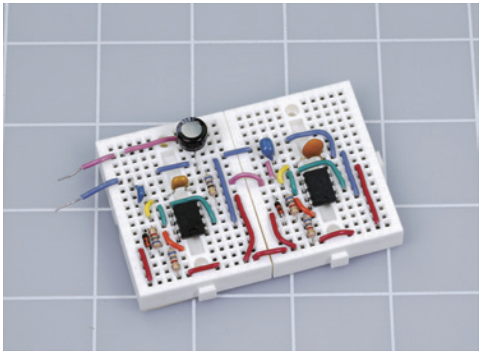


图 2-17　与上图相同的电路，用手工切割的实芯跨接线搭建

更糟糕的是，软跨接线的插头有时有缺陷，可能会造成松动。这会使故障追踪几乎成为不可能。因此：

我不推荐使用两端有插头的软跨接线。

可选工具：绞线

回到绞合连接线的问题上来，它确实有一个优点。它的弹性比实芯线好得多，它可以将电路板和开关或电位器连接起来，用处很大。如果导线连接的物体容易移动或颤动，弹性就非常重要。

软导线对于本书的任何实验都可有可无，因此我们有时会用到 25 英尺长、22 线规的绞线。如果你要买，建议你选择与实芯导线颜色不同的绞线，这样就不会混淆了。

元件

我必须提醒你，本书的元件套装是可以买到的，请参考第 6 章套装一节。如果你想在线购买自己的元件，请参考元件一节。

必要工具：拨动开关

大型拨动开关已经是过时的设备了，但它对你的开关实验仍很有用。你需要两个拨动开关。它们应当是单极双掷开关（Single Pole Double Throw，SPDT），我将在后面详细介绍。也可以用双极双掷开关（Double Pole Double Throw，DPDT），但是可能会稍微贵一点。

带有螺旋式接线柱的拨动开关能减少与连接线连接的不便，但其他类型的接线柱也是可以接受的。

标准的大型拨动开关如图 2-18 所示（例如 E-Switch ST16DD00）。但是更便宜的通用替代品也可以在 eBay 上找到。

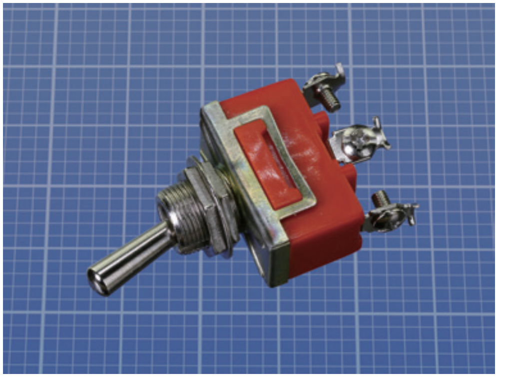


图 2-18　全尺寸拨动开关

必要工具：触摸开关

很奇怪，触摸开关并不是你所想象的那种开关，它是一个很小的按钮。把它插在面包板上，就能为电路接收用户输入提供方便。

最常用的触摸开关有四条腿，可以插在面包板上，但是这样也挺烦人，因为腿和小孔经常不能良好啮合。结果，触摸开关就像一只小蚱蜢一样，会在意想不到的时候蹦出来。建议你使用两脚间距 0.2 英寸的触摸开关。本书的实验自始至终都将使用型号为 Alps SKRGAFD-010 的开关，如图 2-19 所示。两脚间距为 0.2 英寸的其他任何触摸开关都可以作为代替品，例如 Panasonic EVQ-11 系列。

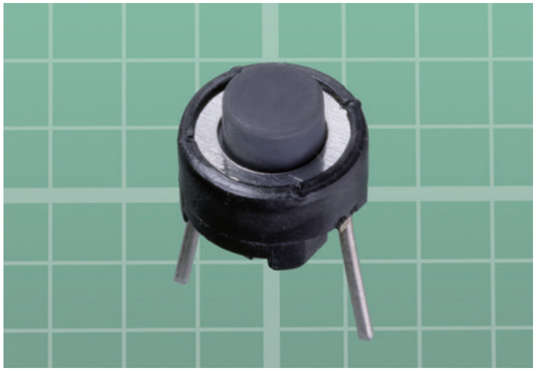


图 2-19　本书建议在面包板实验中使用的触摸开关

必要工具：继电器

因为各家继电器生产商的引脚功能都没有标准化，所以在购买继电器时，要谨慎购买替代品。建议使用型号为 Omron G5V-2-H1-DC9 的继电器，如图 2-20 所示，它的引脚不易混淆，因为引脚功能都印在了器件上。

Omron 是继电器的大型生产商，因此我推荐的这款继电器有望流行一段时间内。你也可以使用型号为 Axicom V23105-A5006-A201 或 Fujitsu RY-92-K 的继电器。它们都是 9 V 直流、双极双掷继电器，它们的引脚间隔如图 2-21 左侧所示。如果用毫米表示，那么 0.2 英寸对应的是 5 mm 或 5.08 mm，而 0.3 英寸对应的是 7.5 mm 或 7.62 mm。

印刷了电路图的继电器看上去应该类似于图 2-21 右侧的图。继电器的数据表几乎都包含电路图。你可以使用引脚功能不同的继电器，但是会带来一些不便，因为它们无法与我将要提供的电路图匹配。

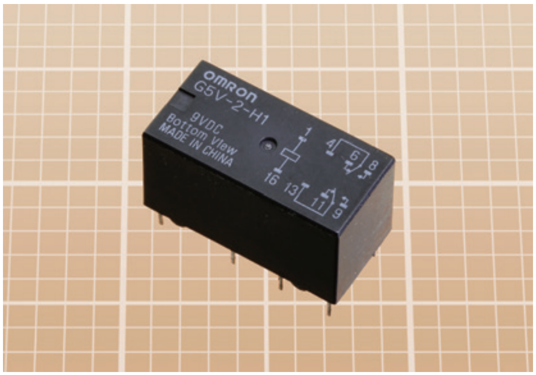


图 2-20　本书建议使用的继电器

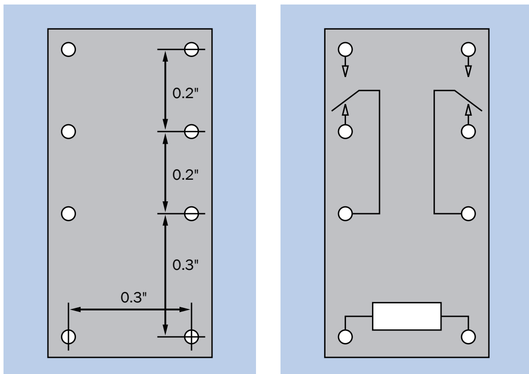


图 2-21　继电器的引脚间距和内部连接方式应当如图所示

我建议使用的继电器是灵敏度高的类型，这意味着它们消耗的电流更少。你可以用其他继电器，但是它们消耗的电流更大。无论你使用的是哪种继电器，直流线圈电压都应相同，引脚间距也要相同。

在购买继电器时应当注意的一点是极性，即要求电流沿某个特定的方向流动，若电流以另一个方向流过线圈，则继电器无法工作。我建议你使用对极性没有要求的继电器，但是松下公司的很多继电器仍然对极性有要求，因此在购买继电器之前要仔细阅读数据表。

最后，你购买的任何继电器都必须是非闭锁型继电器。

如果你对以上内容感到困惑，感觉过于技术化，你可以把购买继电器的事推迟到阅读完实验 7 之后，实验 7 描述了如何使用继电器。你需要两个继电器来进行这个实验。

必要工具：微调电位器

与实验 4 中使用的巨大笨拙的电位器不同，你这次要使用微调电位器，它更小，更便宜，能够插在面包板上，阻值不同的几个微调电位器如图 2-22 所示。

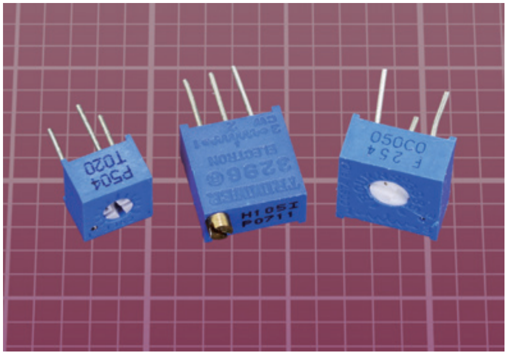


图 2-22　微调电位器

图中左侧和右侧的电位器是我在本书中所选用的类型。它们的引脚插入面包板后，整个元件与面包板平齐。这两个电位器之间唯一的区别是右侧的电位器比左侧的要大。也有的类型与面包板成 90° 角安置，但是不太容易买到。

照片中心的电位器是多转式微调继电器，通过一颗连接到元件内部蜗轮上的黄铜螺丝钉进行更加精细的微调，不太方便，而且更加昂贵，对我们而言并非必需，我们并不需要如此高的精度等级。

必要工具：晶体管

本书只使用一种晶体管。通用部件编号是 2N2222，但遗憾的是，标号同为 2N2222 的晶体管仍有不同。

如果你使用的是元件套装，应该没有什么问题。如果你是自己购物，一定要避免购买在数字 2222 前面标有 P2N 的部件。在 P2N2222 问世时，生产商撤销了数十年来一直作为标准的 2N2222 引脚功能。（他们为什么要这么做？我也不知道。）

以下是规则。

- ❒ 部件编号为 2N2222、PN2222 或 PN2222A 的晶体管都可以。PN2222 比 2N2222 更常用，但是这两种都可以。

❒ 部件编号为 P2N2222 或 P2N2222A 的晶体管都不可以。

这里有一个陷阱。在你搜索 2N2222 时，会得到 P2N2222 的信息，因为搜索引擎会帮助你显示出数字前面有字母的部件。所以——购物要谨慎！如果你有测试晶体管的万用表，把每个晶体管都测一下。如果晶体管有传统的引脚功能，那么万用表将显示它的放大倍数超过 200。如果晶体管的类型不对，万用表将显示出错或放大倍数小于 50。

2N2222 晶体管过去一直用小金属罐封装，而现在它们几乎都用黑色塑料封装。两种类型的晶体管都在图 2-23 中展示。塑料和金属封装的效果都一样好——只要晶体管的部件编号不是以 P2N 开头就行。

必要工具：电容器

电容器没有电阻器那么便宜，但是也不贵，你可以买一小批各种类型的电容器。我们将用到的电容器的取值范围通常以微法计量，简写作 μF。当你开始在电路中应用电容器时，我将详细讲解电容的单位。

对于较小的容值，推荐使用陶瓷电容器。对于较大的容值，电解质电容器要便宜一些。关于购买电容的其他指南，请参考第 6 章元件一节。图 2-24 展示了各种电容器。圆柱形的是电解质电容器，而其他的是陶瓷电容器。

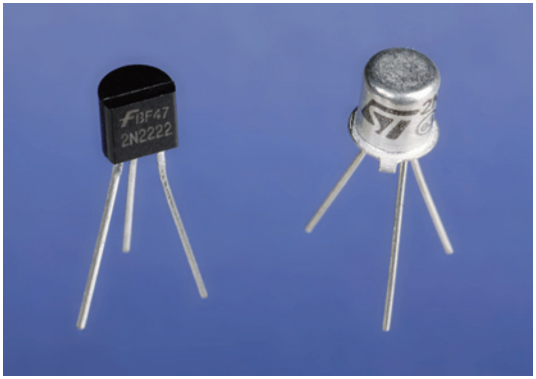


图 2-23　两种 2N2222 晶体管都可以使用

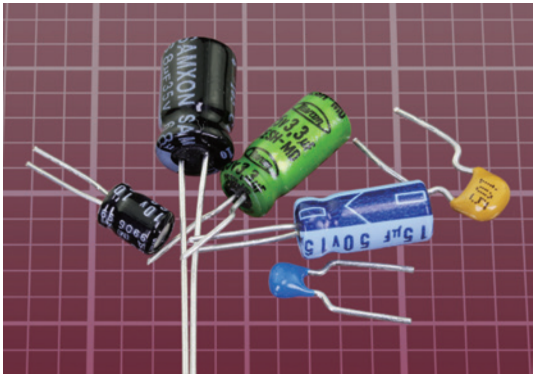


图 2-24　各种电容器

必要工具：电阻器

如果你自己购买元件，我就假设你已经购买了我在实验 1 中建议准备的各种电阻器。

必要工具：扩音器

扩音器的最小尺寸为直径 1 英寸，但是 2 英寸也不错。直径 3 英寸就是最大的了。阻抗应至少为 8 Ω。搜索扩音器时，要记住有些供应商称它们为“扬声器”，按“扩音器”搜索可能会找不到结果。

我们将要处理的不是高保真声音，因此任何一个便宜的扩音器都可用。图 2-25 展示了几个样品。

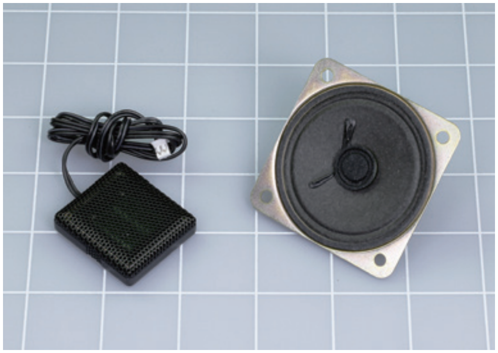


图 2-25　两个扬声器，一个直径为 1 英寸，另一个直径为 2 英寸

其他的呢？

到现在为止，你可能觉得我已经指定了很多元件。请放心，我此处列举的几乎所有物品都是可重复利用的，而且在本书剩下的章节中，也不需要补充太多的部件。

实验 6：非常简单的开关

本实验将帮助你熟悉手动操作开关的功能。你可能觉得自己已经知道如何使用开关了，但是如果把两个双掷开关合并在一个电路中使用，这个主题就更有意思了。

需要的物品

- ❒ 螺丝刀、剪线钳、剥线钳
- ❒ 连接线：22 线规，不长于 12 英寸
- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 通用 LED 1 个
- ❒ 拨动开关：单极双掷或双极双掷开关 2 个
- ❒ 470 Ω 电阻器 1 个
- ❒ 两端有弹簧夹的测试引线 2 条

按照图 2-26 组装部件。此处你需要练习剥导线技能，剥除黑色导线两端的绝缘层。为了把它们固

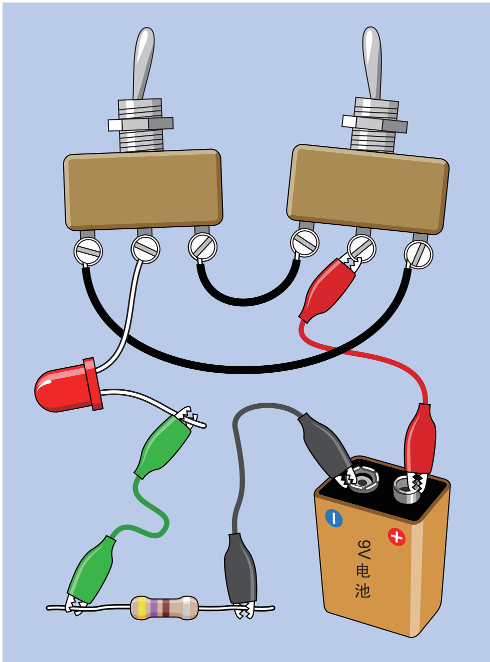


图 2-26　你的第一个开关连接实验

定在开关的螺旋式接线柱上，用钳子弯曲每根导线的末端，把它弯成一个 J 形。然后，从左侧把导线绕在接线柱上，这样当接线柱顺时针拧紧时，就会把导线缠紧。

LED 的长引脚也要连接一个螺旋式接线柱，不要错误地连接 LED 的短引脚。记住，长引脚上的电压总是应该高于短引脚上的电压。

如果开关的接线柱不是螺旋式的，你就不要使用黑色导线，而要用几根带弹簧夹的测试引线来连接，并多加一根测试引线，把 LED 与左侧开关的中央接线柱连接。

连入电池后，开始实验，轻轻拨动开关。你发现了什么？

如果 LED 是亮的，拨动任何一个开关都会使它熄灭。如果 LED 是灭的，拨动任何一个开关都会点亮它。我很快将解释这个有趣的现象（见本章电路图介绍一节），但是我首先必须告诉你一些基本原理和背景知识。

基本原理：关于开关的一切

拨动开关上的手柄是用手指拨动的。在图 2-26 所示的开关中，拨动手柄会使中央接线柱与两侧接线柱中的一个相连，如图 2-27 所示。

中央接线柱叫作开关的极。你可以拨动（掷）开关形成两种可能的连接，因此这种开关叫作双掷开关（Double Toggle，DT，也写作 2T）。单极双掷开关（Single Pole Double Throw，SPDT）有时也写作 1P2T。

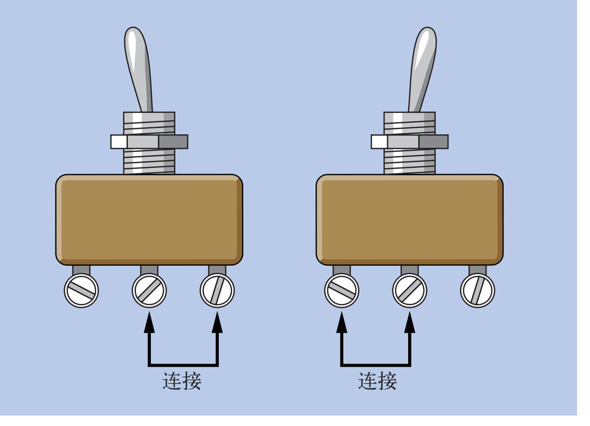


图 2-27　通常，拨动开关的工作方式如图，但也有例外

有的开关只有两个接线柱，而不是三个。两个接线柱是开 / 关，向一个方向拨动就会形成连接，但是向另一个方向拨动不会形成连接。你房间里的大多数照明开关都是这样的。它们叫作单掷开关。单极单掷开关（Single Pole Sinle Throw，SPST）有时也写作 1P1T。

有些开关的两极是完全分离的，因此在拨动开关时可以同时形成两个单独的连接。它们叫作双极开关（Double Pole，DP，有时也写作 2P）。请参考图 2-28、图 2-29 和图 2-30 中的老式“闸刀”开关，它们用来在学校向孩子们讲授电子学知识。图中的开关不会用于实际目的，但是它们非常清晰地显示了 SPST、SPDT 和 DPST 连接之间的区别。

唯有在恐怖电影中，你才可能看到闸刀开关用于严肃目的。图 2-31 中，一个疯狂的科学家正在用一个单极双掷闸刀开关给自己的实验仪器充电，开关安装在地下实验室的墙上，还挺方便的。

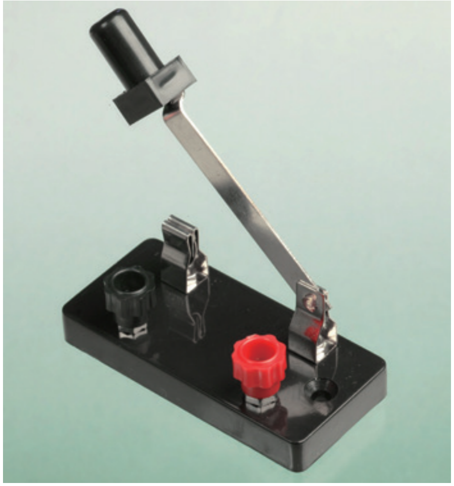


图 2-28　为教学目的制作的开关，单极单掷（SPST）开关



图 2-29　单极双掷（SPDT）开关，一个极可选择几个触点



图 2-30　双极双掷（DPDT）开关，有两个完全互相隔离的极。每个极只能与一个触点连接

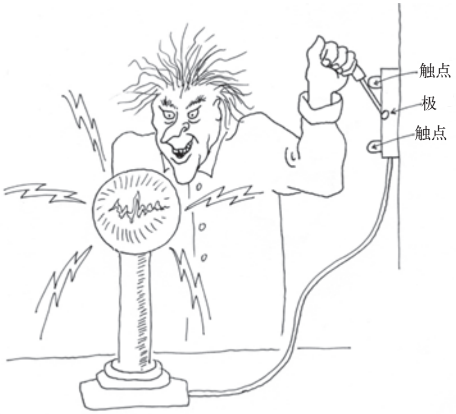


图 2-31　疯狂的科学家和 SPDT 闸刀开关

为了使实验更有趣，你可以购买有三四个极的开关。（一些旋转开关的极甚至更多，但是我们用不到。）而且，一些双掷拨动开关有一个额外的“中位断开”位置。

为了归纳以上内容，我做了一张表格，列出了一些可能的开关类型以及描述它们的简称。按钮开关也使用相同的简称，如图 2-32 所示。如果你正在阅读一张部件目录，就可以参考这张表格来提醒自己这些缩略语的意思。

有些开关装载有弹簧，当你释放加在开关上的压力时，开关会弹回默认位置。见到用圆括号标出的 ON 或 OFF，你就知道需要维持开关上的压力才能使它保持在原位。

以下是几个例子。

- ❐ OFF-(ON)：“ON（开）”状态在括号中，是瞬时状态。因此，这是一个单极开关，只有在拨动时才会形成连接，松开手就会回到原位，断开连接。它也叫作“常开型”瞬时开关，简写为“NO”。大多数按钮开关也采取这种工作方式。
- ❐ ON-(OFF)：与瞬时开关相反。它通常是 ON 状态，但拨动它时，就断开了连接。因此，OFF（关）状态是瞬时的。这种开关叫作“常闭型”瞬时开关，简写为“NC”。
- ❐ (ON)-OFF-(ON)：这种开关中位断开。向任何一个方向拨动它，都会形成瞬时连接，松手后又回到中间位置。

	单极	双极	三极	四极
单掷	SPST (1P1T) ON-OFF	DPST (2P1T) ON-OFF	3PST (3P1T) ON-OFF	4PST (4P1T) ON-OFF
双掷	SPDT (1P2T) ON-ON	DPDT (2P2T) ON-ON	3PDT (3P2T) ON-ON	4PDT (4P2T) ON-ON
中位断开双掷开关	SPDT (1P2T) ON-OFF-ON	DPDT (2P2T) ON-OFF-ON	3PDT (3P2T) ON-OFF-ON	4PDT (4P2T) ON-OFF-ON

图 2-32 本表格总结了各种拨动开关和按钮开关

开关也可能有其他形式，例如 ON-OFF-(ON) 或 ON-(ON)。只要记住括号表明的是瞬时状态，你就能明白这些开关的工作方式。

电火花

在电流通和断的瞬间，容易产生电火花。电火花对开关触点有害，它会侵蚀触点，使开关无法再形成可靠的连接。因此，你必须使用与工作电压和电流相适合的开关。

本书中的电路均为低电流、低电压的类型，因此几乎任何开关都可以使用；但是如果要给发动机配置开关，在电路通断的瞬间，流过开关的电流很容易达到发动机正常工作电流的两倍。例如，通断工作电流 2 A 的发动机，应该使用额定电流 4 A 的开关。

检测连续性

你可以使用万用表来检测开关。这一操作能告诉你把开关向某个方向拨动时，哪些触点是相互连接的。如果你使用的是按钮开关，而且想不起来它是常开型开关（按压以形成连接）还是常闭型开关（按压以断开连接），这一操作也很有用处。

在检测开关时，把万用表设置为测量“连续性”会很方便。万用表在检测到连接后会嘟嘟响（或发出视觉提示），如果没有检测到连接，则没有提示。请参考图 2-33、图 2-34 和图 2-35。

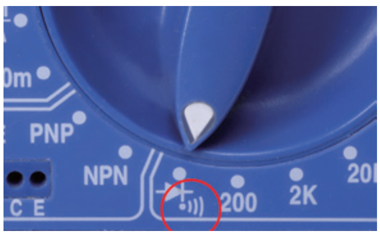


图 2-33 拨到测量连续性的万用表表盘

中万用表设置为测量连续性的示例。记得吗，在实验 1 中，我展示过万用表上代表连续性的符号。如图 1-7 所示。



图 2-34　另一个测量连续性的万用表表盘

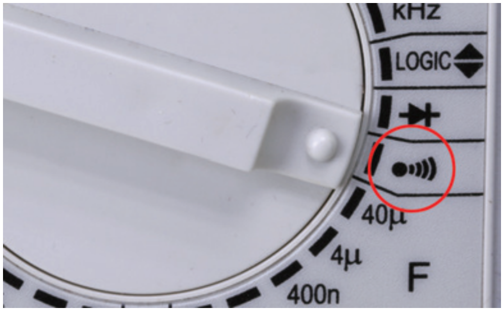


图 2-35　第三个测量连续性的万用表表盘

背景知识：早期的开关系统

开关是电子世界的一种最基本元件，它们的概念非常简单，以至于我们很容易忘记它们也经历过逐步的发展过程。原始的闸刀开关对于电学先驱已经足够，他们只需要控制实验室中一些装置的通断；而随着电话系统的普及，电路需要一种更复杂的方法来控制。典型情况下，“交换机”接线员需要连接 10000 条线路中的每一条。这要如何做到呢？

1878 年，查尔斯 • E. 斯克里布纳（Charles E. Scribner，如图 2-36 所示）研制出了“折刀开关”，如此命名是因为接线员手持的部分看起来像折刀手柄。一个插头从开关中伸出，当插头插入插座时，就在插座内部形成了连接。插座实际上包含开关触点。

吉他和放大器音频连接器的工作原理也是相同的，当我们说到“插座”时，这一术语就回溯到了斯克里布纳的发明。开关触点仍然安装在插座内。

如今，电话交换机当然已经和接线员一样少见。它们先是被继电器，也就是电控开关所取代，我将在本章中稍后讲解。然后，继电器又被晶体管所取代，晶体管使得电路的运行摆脱了活动部件。在实验 10 中，你将使用晶体管开关电路。



图 2-36　查尔斯 • E. 斯克里布纳发明了“折刀开关”，以满足 19 世纪末电话系统的开关需求。今天的耳机插座的工作原理依然相同

电路图介绍

在图 2-37 中，我用简化的方式（电路图）重新绘制了图 2-26 中的电路。从现在起，我将利用电路图说明电路，因为电路图会使接线更易理解。你只需知道几个符号就能解释电路图。

图 2-26 和图 2-37 展示了相同的元件和连接方式。在电路图中，呈“之”字形的符号是电阻器，带有两个斜箭头的符号是 LED，而电池用两条长度不等的平行线表示。

LED 符号中的大三角形表明了传统电流的流动方向，即假想的电流从正极流向负极。两个斜箭头表明该器件是发光二极管（后面我会讲到其他种类的二极管）。在电池符号中，较长的一条线表示电池正极。

追踪电流通过电路的路径，想象不同的开关位置。你现在应该能明白，为什么任何一个开关都可以反转 LED 的状态，从开变成关，或从关变成开。

图 2-38 展示了经过简化后的同一幅电路图。线路是笔直的，电源表示为正极，在图的左上角，而负极在图的右下角。在电路图中，你会看见传统电流的流动方向从上到下，而某些类型的信号（例如放大器的音频输入）从左到右移动。电路的自顶向下结构使得它更容易理解。

需要注意的重要一点是：虽然两幅电路图看起来不同，但它们展示的是完全相同的电路。真正重要的是元件的类型及它们的连接方式，而元件的准确位置则与电路图无关。

> 电路图不会告诉你把元件放置在哪里。它只告诉你如何将元件连接在一起。

顺便说一下，你家里可能就有图 2-38 中电路的例子，如果有两个电灯开关安装在一架楼梯的顶端和底端，而且任一开关都可以控制灯的亮灭，那么这样的电路肯定和例子中的原理相同。图 2-39 展示了这个例子，其中交流电源的火线和零线从电路图的左下角接入。火线上安装有开关，而零线布设在火线一旁，与

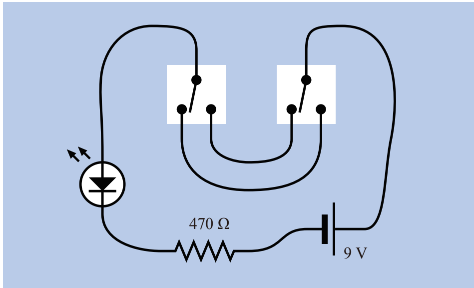


图 2-37　此处用电路图重新绘制有两个开关的电路

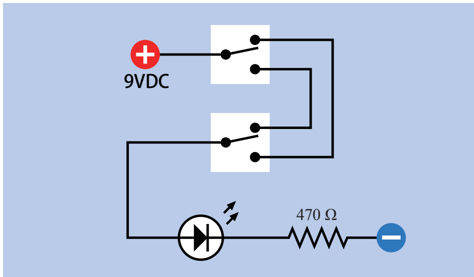


图 2-38　使用更传统的线路绘制的上一幅电路图

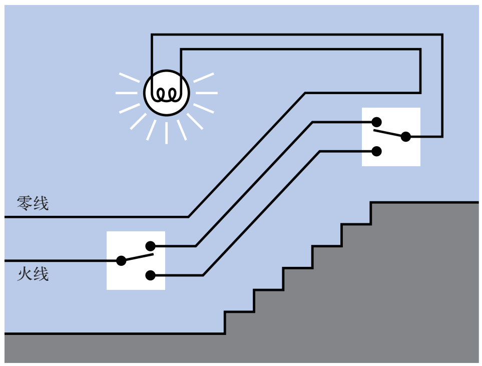


图 2-39　在住宅里应用与前图相同的电路，两个开关控制一盏灯

灯泡相连接（中间有一条曲线的白色圆圈代表老式的白炽灯泡）。

电路图的唯一问题是：有的符号没有标准化。你可能会见到好几个符号都表示同一件事物。我将在后面的内容中逐步介绍它们。①

基础知识：基本电路图符号

1. 开关：图 2-40 展示了单极单掷开关这种最基本元件的五种表示符号。每个符号中，开关的极都恰巧在右侧，而触点在左侧——虽然这对于 SPST 开关并没有什么显著差异。本书中，我选择用白色方框圈住每个开关，强调虽然开关有两个部分，但它们共同组成一个元件。

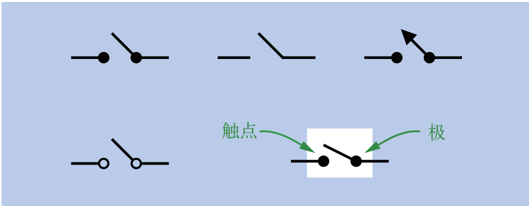


图 2-40　单极单掷开关电路图符号的五种形式。它们的功能相同

图 2-41 展示了略为复杂的双极双掷开关符号。虚线表明在拨动开关时，虽然开关的两个极和两对触点互相电隔离，但两个极一起运动。中间的符号有时会出现在大型电路图中，因为大型电路图的布局使得开关的各部分难以相互靠近。每对触点都用 A、B、C……结尾的简写标明，这样你就明白，这些触点实际上包含在一个开关内。

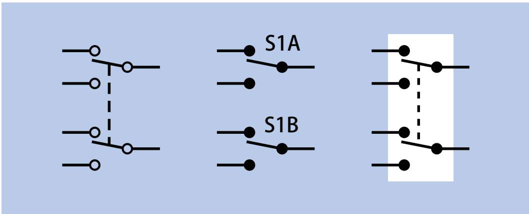


图 2-41　双极双掷开关符号的三种形式

2. 电源：DC（直流）电源有多种表示方法。图 2-42 的上面部分展示了电池的符号。短线表示负极，长线表示正极。习惯上，一组长短线代表单个的 1.5 V 电池，两组线代表 3 V 电池，等等。但是若电路使用高电压，且含有真空管，绘制电路图的人员通常会在电池之间画上一条虚线，而不是把它们全部画出来。

简单电路图可能仍使用电池符号，但正负直流电更常用单独的符号表示，如图 2-42 的中图和下图所示。正电加在电路中，标记为 Vcc、VCC、V+、+V 或 +V 加上电压数值。最初，VC 指晶体管集电极上的电压，VCC 指整个电路的供电电压，现在无论电路中有无晶体管，都这样使用

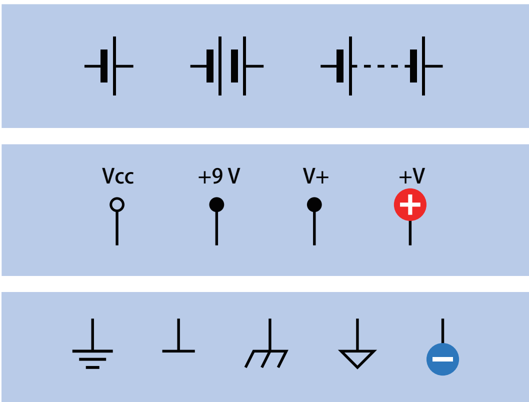


图 2-42　表示直流电正负的各种方法

① 关于基本电路符号，中国的绘制标准同美国、欧洲有所不同。详见国家标准 GB/T 4728。——编者注

VCC。很多人用着 VCC，却不知道它的来历。

本书有幸能印刷彩图，我就用带红圈的加号来表示输入正电压。

电源的负极可以用图 2-42 中下部的任一符号表示。它可以指“负极接地”或只是“地”。因为电路中的很多部分都分享负电势，所以会有多个接地符号出现在电路图上。这比起画很多条线，再把它们连到一起要方便很多。

本书中，我用带蓝圈的减号表示负电，因为这很直观。但你一般不会在电路图中见到它。

目前为止，我们一直在讨论电池供电。在使用壁式插座交流电源的小器件中，情况更加复杂，因为壁式插座有三个插孔，分别对应火线、零线和地线。电路图一般把交流电源画成侧放的 S 形，如图 2-43 所示。电源的电压通常会标出来，在美国一般为 110 V、115 V 或 120 V。在电路的其他部分，图 2-43 右侧所示的符号指安装电子元件的底盘。

注意，家用交流电源插座的接地引脚确实与建筑物外的大地相连。带金属底盘的电子设备连接了接地引脚就是“接地”了。在电压不高的电池供电电路中，没有必要把电路接到“大地”，但仍然可能使用接地符号。



图 2-43　交流电（左侧）和交流设备底盘（右侧）的符号表示

3. 电阻器：电阻器只有两种表示符号，如图 2-44 所示。左侧的符号在美国使用，旁边的数字表示电阻器的阻值。或者，电阻器也可以标为 R1、R2、R3……，阻值在单独的部件表里列出。图 2-44 右侧的符号源于欧洲，上面的数字也是电阻器的阻值。图中的 220 Ω 是任意选取的。

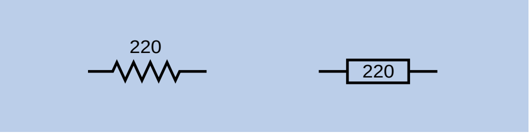


图 2-44　电阻器在美国（左侧）和欧洲（右侧）的符号

记住，若电阻值包括小数点，欧洲人会省略小数点，用 K 或 M 代替；而小于 1kΩ 的电阻表示成字母 R 后面跟着一个或多个数位。

4. 电位器：图 2-45 中，左侧的符号在美国使用，而右侧的符号在欧洲使用。两个符号的箭头都表示电位器的滑动片。470 Ω 是任意选取的。

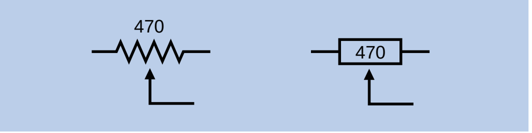


图 2-45　美国使用左侧的电位器符号，欧洲使用右侧的电位器符号

5. 按钮开关：图 2-46 展示了三种可用的符号。这些符号代表最常见的“常开”型按钮开关或瞬时开关（对开关施加压力时，两触点闭合；释放压力，电路断开）。在更复杂的按钮开关中，按压一个按钮就能开闭多个触点，这时可能用到多极开关符号。

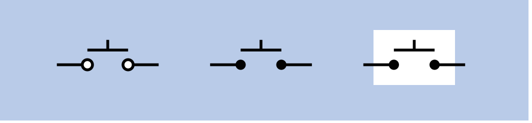


图 2-46　按钮开关的三种表示符号。本书加入白色方框，让图像更加清晰，但别的地方用不到

6. 发光二极管：图 2-47 展示了发光二极管（Light Emitting Diode，LED）的四种表示符号。无论是否有圆圈，也无论三角形是实心的还是空心的，它们的意义都相同。本书将圆圈白色高亮是为了看上去更清楚，但其他地方不会这样表示。在绘制电路图时，为了方便，LED 符号可能会朝向任何方向，箭头也可能指向任何方向。

我将在后面介绍其他的电路图符号。与此同时，你要牢记以下几条重要信息。

- 电路图中元件的位置并不影响功能。
- 电路图中使用的符号风格并不重要。
- 元件之间的连接非常重要。

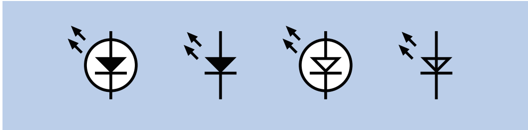


图 2-47　LED 的四种表示符号，功能相同

电路图布局

我在前面说过，电路图通常把正电压画在上方，把负电压画在下方。这个习惯对于理解电路的工作方式非常有用，却对于实际电路的连接毫无帮助，因为你使用的面包板的几何结构和电路图肯定完全不同。

我见过的所有电子学教材几乎都会要求把图上画的电路转换成面包板上的电路。这很困难，而且可能成为学习电子学的巨大障碍。因此，本书中的电路图形式与面包板相似。当你在实验 8 中用到面包板之后，这样的电路图就更有意义了。

线路交叉

关于电路图的最后一个主题是交叉导线的表示。在你搭建过的简单电路中，至今还没有线路交叉，但是随着电路越来越复杂，导线必定要互相交叉，又不能形成电连接。电路图怎么表示这一点呢？

本书的第 1 版中，我使用的表示法是一根导线在另一根导线上方跨过一个小半圆。图 2-48 把这种方法标为“老式”的。我仍然喜欢这种方法，这样可以清楚地看到导线没有形成电连接。但是，几十年前，画小半圆变得麻烦了，因为人们开始用图形软件而不是笔和墨水来绘制电路图。从那

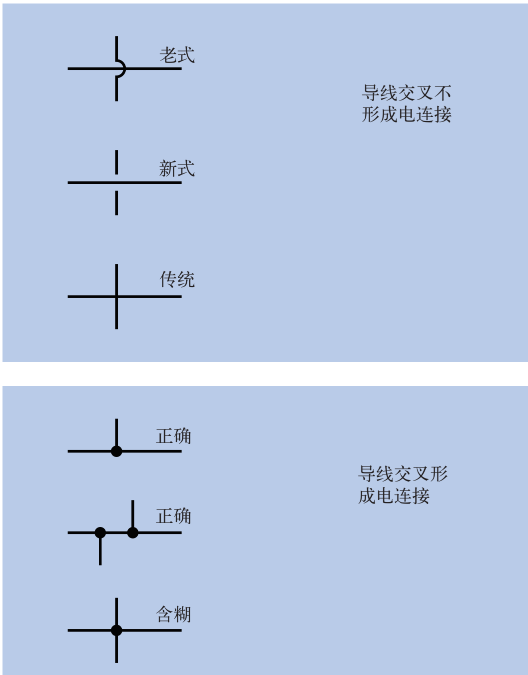


图 2-48　描述导线是否相连接的各种方式

时起，这种方法就用得少了。

另一种方法在图 2-48 中标为“新式”的，有一根导线中间断开。这很让人困惑，而且自动电路图绘制软件也不太容易画出来。因此，这种方法也用得少了。

第三种方法标为“传统”的，现在很常用。在本书中，我决定与世界其他地区使用的传统方法保持一致，尽管我觉得它没有第一种方法清晰。

你可能也在想，如果两条互相交叉的线没有形成电连接，那么当它们形成电连接时又该怎么画呢？答案是画一个点。为了避免混淆，这个点应该画大一些，而不是只有针尖大小。图 2-48 的下半部分展示了这一画法。于是我们得到了一般规则。

❒ 两条互相交叉的导线表明没有电连接。

❒ 导线若交叉于一个点，表明有电连接。

还有一点需要注意。为了清晰，建议你最好避免图 2-48 底部的表示方式。它太不明确了。如果不采用这种方式而是采用它上面的表示方式，我们就会明白，彼此交叉的导线无论如何都不会形成连接。

彩色导线

我说过线路交叉是关于电路图的最后一个问题吧？其实还有一个小问题。因为我不希望你弄混电源的正负极，所以我将把本书后文电路图中所有连接正极的导线都涂成红色，而把所有连接负极的导线都涂成蓝色。读者向我反映过，我以往偶尔使用这种方法时很有帮助，因此本书中我将自始至终这样绘图。

黑色更常用来表示负极 / 接地（比如万用表或者电池连接器上的黑色导线）。但是有时也会使用蓝色，蓝色更加与众不同。

你需要记住，本书以外的电路图不会使用这种有帮助的着色方法。所有的导线都是黑色的，你将不得不找出哪些是与电源连接的。

实验 7：研究继电器

探究开关的下一步是使用遥控开关。“遥控”的意思是开关根据你发送的信号断开或闭合。这种开关叫作继电器，因为它将电路一部分的指令传递给另一部分。

> 继电器通常由低电压、小电流控制，用来开关高电压或大电流。

继电器非常有用。例如，在启动汽车时，一个较小较便宜的点火开关通过一根细细的廉价导线将一个小信号送到起动电动机附近的继电器上。继电器通过一段更短、更粗、更贵，能够承受 100 A 电流的导线发动电动机。

同理，如果你在老式上开门洗衣机的旋转阶段掀起洗衣机的盖子，就闭合了一个小开关，它把一个小信号沿一条细细的导线传送到继电器。开关控制旋转洗衣桶的大电动机是继电器的任务。

需要的物品

- ❒ 万用表、多用途刀具
- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 双极双掷 9 V 直流继电器 2 个
- ❒ 单极单掷触摸开关 1 个
- ❒ 两端有弹簧夹的测试引线 5 条

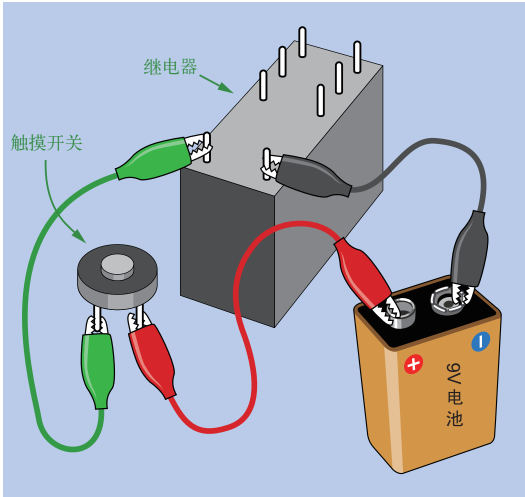


图 2-49　探究继电器内部工作情况的第一步

继电器

我建议你使用的继电器一端有两个引脚，另一端有六个引脚。这六个引脚分成两行三列，如图 2-49 所示（继电器颠倒过来，引脚向上）。如果你买了两个继电器，可以将其中之一用于研究（即把它打开，观察内部的结构）。如果你非常仔细地操作，继电器应该随后还能用。如果不小心弄坏了，它也能当个备件。

注意：极性问题

有些继电器对于施加到内部线圈上的电压要求很高。电流在线圈中沿某个方向流动时，一切正常，但是如果反转正负连接方式（即反转极性），继电器就停止工作。

如果继电器的数据表没有写清楚极性要求，那可真烦人。我建议使用的继电器对极性没有特定的要求。请参考本章必要工具：继电器一节。

步骤

将测试引线和触摸开关（按钮开关）如图 2-49 所示连接。（注意，图中的器件不是按比例绘制的。）闭合按钮开关，把 9 V 电压加到独立的两个引脚上，你应该能听见非常轻的“咔哒”声。断开开关，应该又能听见一声“咔哒”声。（如果听力不太好，可以轻轻地用指尖触碰继电器，当“咔哒”声出现时，应能感觉到一阵微弱的振动。）

发生了什么？万用表能协助你进行研究。将万用表设置为测量连续性，把两根表笔靠在一起，

证实万用表正在工作。如果没有发出蜂鸣声，就是还没有设置为测量连续性，或是电池没电了，或是有一根表笔插入了错误的插口。

现在，如图 2-50 所示，用表笔压住引脚，按下按钮。在按下按钮的同时，万用表会发出蜂鸣声。

这个测试告诉你，向距离你最近的一对引脚施加电压时，继电器内部必定有一些开关是闭合的。但是，用表笔压住引脚的同时再去按按钮可能有点困难。如果是这样，可以按照图 2-51 所示的方法，添加几根测试引线。每根引线的一端夹住一根表笔，另一端夹住继电器引脚，这样你的双手就解放了。

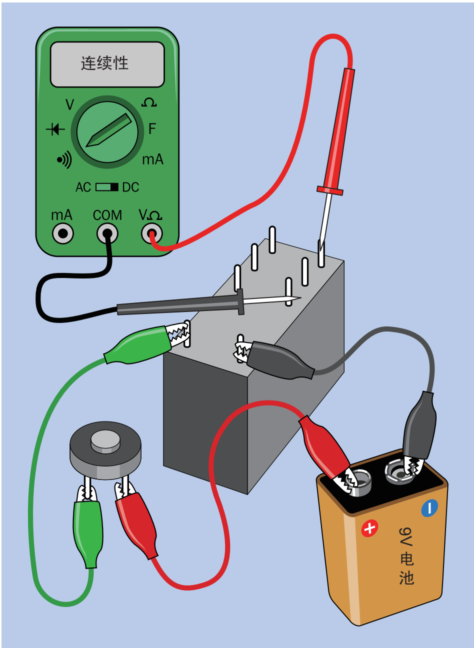


图 2-50　第二步是测量连续性

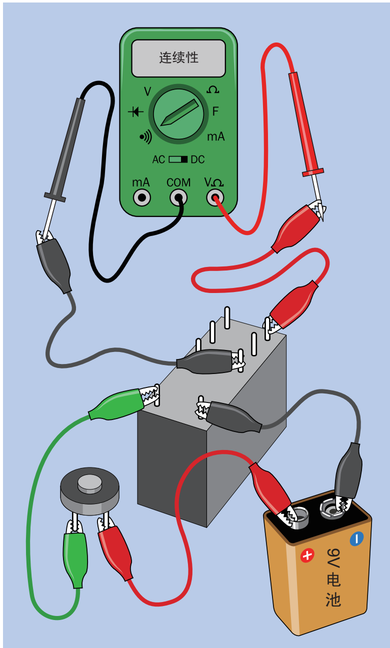


图 2-51　你可以用测试引线把表笔延长，从而省去握住表笔的麻烦

现在把红色测试引线从距你最远的继电器引脚移到与它相邻的空引脚上。你会发现，万用表的响应与上一次相反，在按钮没有按下时会发出蜂鸣声，按下按钮则蜂鸣声停止。

继电器内部发生了什么

图 2-52 展示了按下按钮时，继电器内部的透视照片。继电器底部有一个线圈，它会产生磁场，磁场控制内部的一对开关。线圈使右侧的开关动作，使引脚 A 和 C 在内部形成连接，因此万用表发

出蜂鸣声。

你可能想知道继电器内的线圈为何要推动内部开关远离它。原因是，继电器内有一个机械联动装置，能将拉力转变成推力。稍后我讲到打开继电器的内容时，你就能观察到这一点。

图 2-53 展示了在未按下按钮时发生的情况。开关触点松开，连接到另一对触点上，断开 A 和 B 之间的连接，在 B 和 C 之间形成连接。当没有电流通过继电器线圈时，开关保持在这个位置。

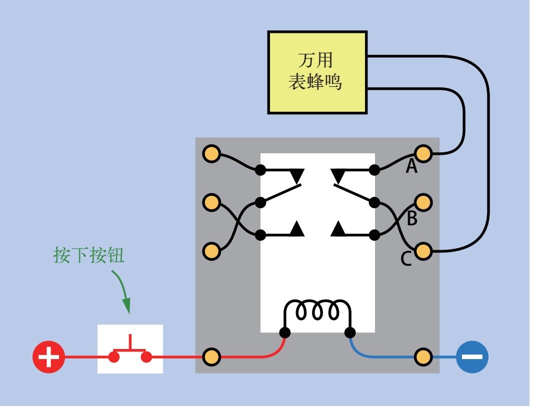


图 2-52　继电器内部；按下按钮，万用表开始蜂鸣

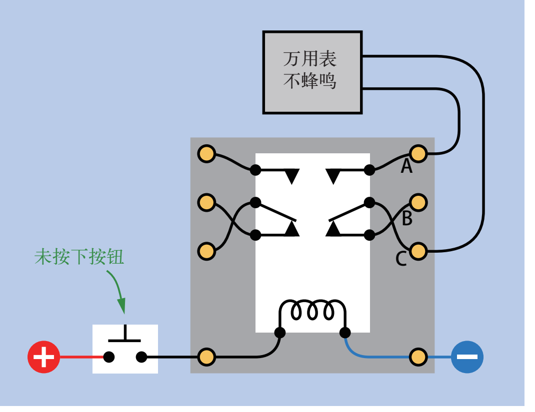


图 2-53　继电器内部；未按下按钮，万用表不蜂鸣

其他继电器

我相信我所描述的引脚功能对于这种尺寸的继电器最为常见，但是也有一些例外。事实上，本书的第 1 版使用的继电器引脚功能就不一样。

当你第一次见到双极双掷继电器时，如何确定内部的构造情况呢——给线圈施加电压，同时用万用表测量每对不同的引脚。使用排除法，你就能知道引脚是如何连接的。

你也可以阅读生产商的数据表。它应该包含如图 2-21 所示的图表。

这些就是你应该了解的关于继电器的所有知识吗？不，我只是触及了一点皮毛。

❒ 一些继电器是**闭锁式**的，即在不通电时，内部的开关会保持在任意位置。闭锁式继电器通常有两个线圈来操作开关向两个方向闭合。本书中，我不会使用这种继电器。

❒ 有的继电器有两个极，有的只有一个；有的是双掷型，有的是单掷型。

❒ 有的线圈用交流电控制开关，有的则用直流控制，而且如前文所述，有的直流线圈要求施加的直流电压极性正确。

一如既往，数据表应当提供必要的信息。

图 2-54 展示了各种继电器的电路图符号。A 是单极单掷继电器，B 是单极双掷继电器，C 是单极单掷继电器，画成了我喜欢的形式，用一个白色长方形提醒你这些部件都封闭在一个元件内。D 是单极双掷继电器，E 是双极双掷继电器，F 是单极双掷闭锁式继电器。

在未通电时，继电器内部开关通常绘制为处于松弛状态，而闭锁继电器的绘画方法有所不同，它的开关位置是任意的。

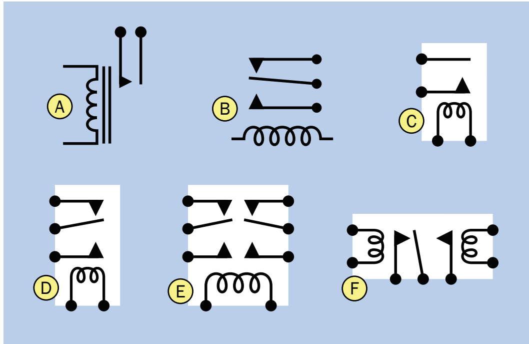


图 2-54　各种继电器的电路图符号

你正在检测的是一个小信号继电器，它不能控制大电流的通断。大继电器则能控制数安的电流。一定要选择额定电流不小于电路最大电流的继电器，因为继电器过载会产生火花，从而迅速损坏触点。

在未来的实验中，你会发现继电器的一些实际用途——例如在家庭安全系统总的应用。在接触这个系统之前，我将向你展示如何将继电器改造成会嗡嗡叫的振荡器。但是首先要了解一下继电器的内部结构。

拆开继电器

如果你比较着急，可以使用如图 2-55 和图 2-56 所示的方法拆开继电器。但是，一般来说，使用最常见的设备（美工刀或多用途刀）会更好一些。


图 2-55　拆继电器的第一种方法（恐怕不宜推荐）


图 2-56　拆继电器的第二种方法（绝对不推荐）

图 2-57 和图 2-58 显示了我喜欢使用的方法：斜着削去塑料外壳的边缘，直到看见一条细细的缝为止。不要继续削下去了，因为此时内部的部件距离刀刃非常近。现在清除切开的表层。在外壳剩下的几条边缘上重复此操作，如果你真的很小心，即便继电器内部的部件会露出来，线圈通电后也能工作。

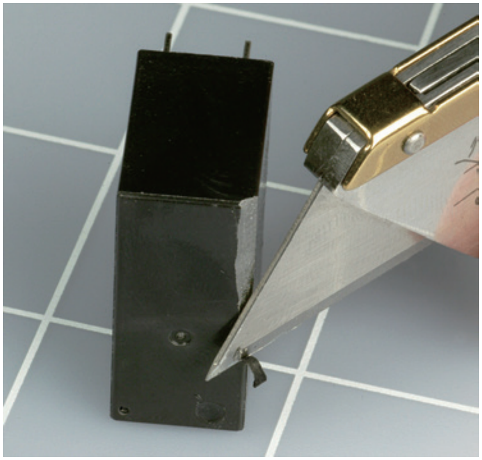


图 2-57　切削继电器塑料外壳边缘是拆开继电器的第一步，一定要从远离自己的地方开始，切削方向朝向下方的工作台

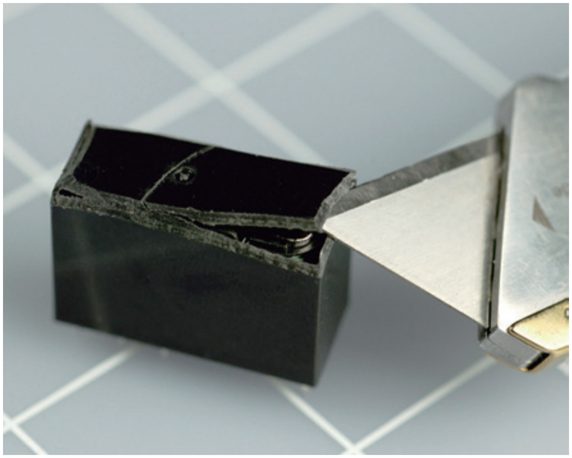


图 2-58　切削完边缘，你应该能撬开外壳的一个侧面

里面有什么?

图 2-59 展示了标准继电器内部元件的简化图。线圈 A 产生磁引力，拉动杠杆 B 向下运动。塑料延展杠杆 C 向外挤压弹性金属条，推动继电器的极 D 在触点之间移动。（这个继电器与本书实验所推荐的结构略有不同，但是原理大致一样。）

你可以把此图与我拆开的一个继电器相比较，如图 2-60 所示。

图 2-61 展示了去掉外壳的各种尺寸的继电器。恰巧，它们都在 12 V 直流下工作。最左侧的汽车继电器最简单，也最容易理解，因为它的设计并没有过多考虑包装的尺寸。较小的继电器的设计更加精

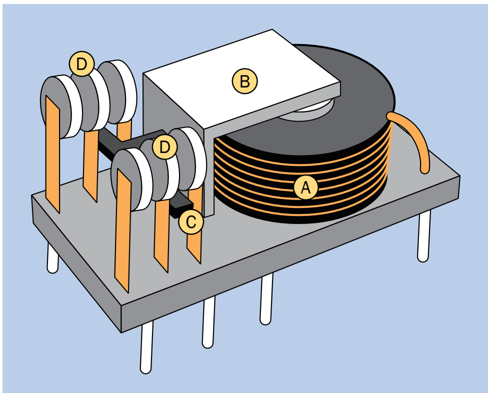


图 2-59　继电器内部结构的简化图

巧，更加复杂，也更难以理解。通常，较小的继电器设计用来通断的电流比大继电器更小，不过也有例外。

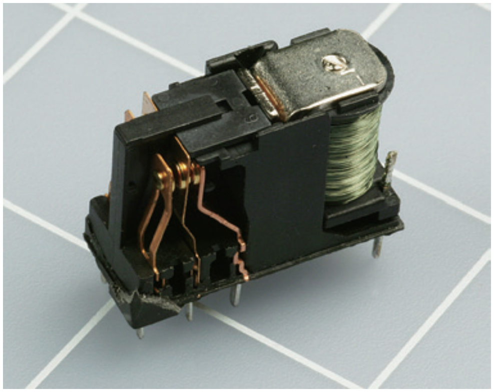


图 2-60 拆开的继电器；切割垫上的方格尺寸是 1 英寸 ×1 英寸

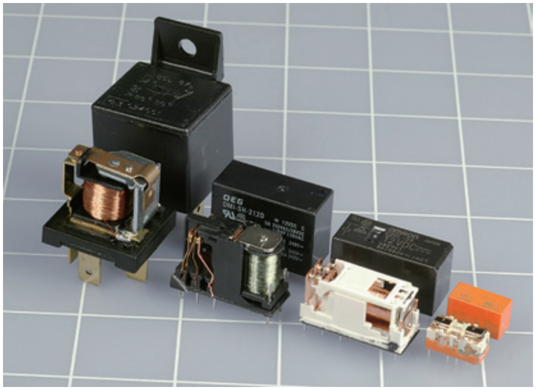


图 2-61 各种 12 V 继电器

基础知识：继电器术语

线圈电压是继电器通电时，应当获得的电压。该电压可以是交流或直流电压。

设定电压是继电器能够闭合开关的最小电压。该电压略小于理想线圈电压。实际上，继电器的工作电压可能比设定电压还要低，但是设定电压能告诉你保证继电器正常工作的最小电压是多少。

工作电流是继电器通电后线圈的功率消耗，一般用毫安表示。有时消耗的功率用毫瓦表示。

开断容量是继电器内部的开关在不受损的情况下控制通断的最大电流。通常，该术语用于描述阻性负载，阻性负载是指白炽灯泡之类的无源器件。当你使用继电器开启电动机时，电路中就引入了感性负载，它在电动机达到正常转速之前会产生巨大的初始浪涌电流。关闭电动机则会产生另一股浪涌电流。如果继电器的数据表没有标明其处理感性负载的能力，经验法则是：假设电动机在启动时的电流是其正常工作电流的两倍。

实验 8：继电振荡器

在前几个实验中，你使用了带弹簧夹的测试引线，它们有两大优点：你可以迅速连接好电路，也很容易明白电路的连接方式。

但是，你迟早要熟悉一种更快、更方便、更简洁、更通用的电路搭建方法，时机正好。我指的是最常用的原型设备：无焊面包板。

20 世纪 40 年代，电路是在平台上搭建的，这些平台看起来确实像可以切面包的案板。导线和元件用钉子或螺母固定到位置上，因为这比固定在薄金属片上容易得多。记住，当时还没有几件塑料产品。（一个没有塑料的世界——你能想象吗？）

如今，“面包板”这一术语指的是一块长 7 英寸、宽 2 英寸、不厚于 1/2 英寸的小板子，如图 2-10 所示。它是能快速、简便组装电路的理想系统。唯一的难题是，它在元件之间形成了难以看清的内部连接——但是我有办法帮你应对这些连接。

学习面包板实验的最佳方法是组装电路，这正是你将要进行的实验。这个实验接着上一个，探索更深一步。

需要的物品

- ❒ 钳子、剪线钳、剥线钳
- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 电池连接器 1 个
- ❒ 面包板 1 块
- ❒ 双极双掷 9 V 直流继电器 1 个
- ❒ 通用 LED 2 个
- ❒ 触摸开关 1 个
- ❒ 470 Ω 电阻器 1 个
- ❒ 1000 μF 电容器 1 个
- ❒ 连接线，至少两种颜色，每种颜色不长于 12 英寸

初学者的电路板

图 2-62 展示了电路板的上半部分，以及我希望你插入面包板的元件。

如果你想知道其中的一些元件究竟是什么，图 2-63 展示了本书后面章节中，面包板电路图上所用元件的形象化符号。大多数元件你还没有遇见过，但是可以将这幅图作为参考。

图 2-62 中，面包板中间是上一个实验用过的继电器。从上方看不见继电器的引脚，因为它们都插在下方的面包板里。我已经展示过引脚的位置，这样你就知道如何放置继电器了（即，连接线圈的引脚在底部）。我也展示过继电器内部的连接方式，提醒你它们的配置如何。开关处于继电器未通电时的位置（“松弛”位置）。

灰色的圆形物体是按钮开关，它更确切的名称是触摸开关。我也展示了它的引脚位置透视视图，这样你就知道应该如何摆放它了。

两个红色的圆形物体是 LED。要确保每个 LED 的长引脚位于图中画加号的一侧。

电阻器的阻值是 470 Ω——但是你可以观察色带，读出它的阻值。

插在面包板上，看起来像导线的红色、绿色和蓝色的小段确实就是插在面包板上的导线。我的下一个任务就是告诉你如何制作这些导线。

制作跨接线

如果购买了各种各样的预制连接线（也叫跨接线），你可以直接把它们按照如图所示的位置插到面包板上，尽管它们的颜色与插图上的不一致。

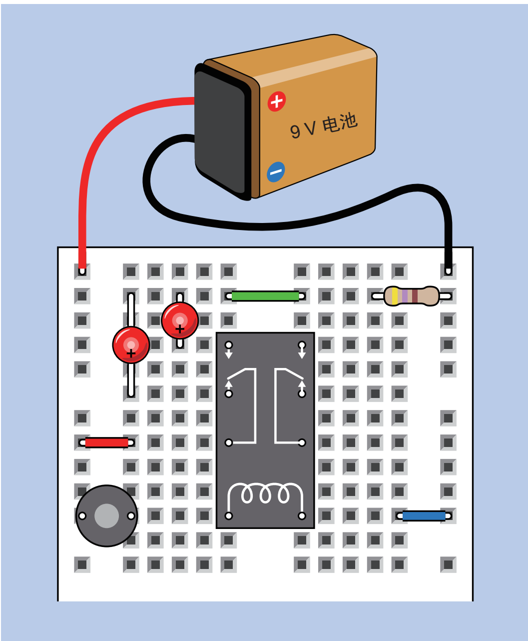


图 2-62　安装在面包板上的继电器测试电路

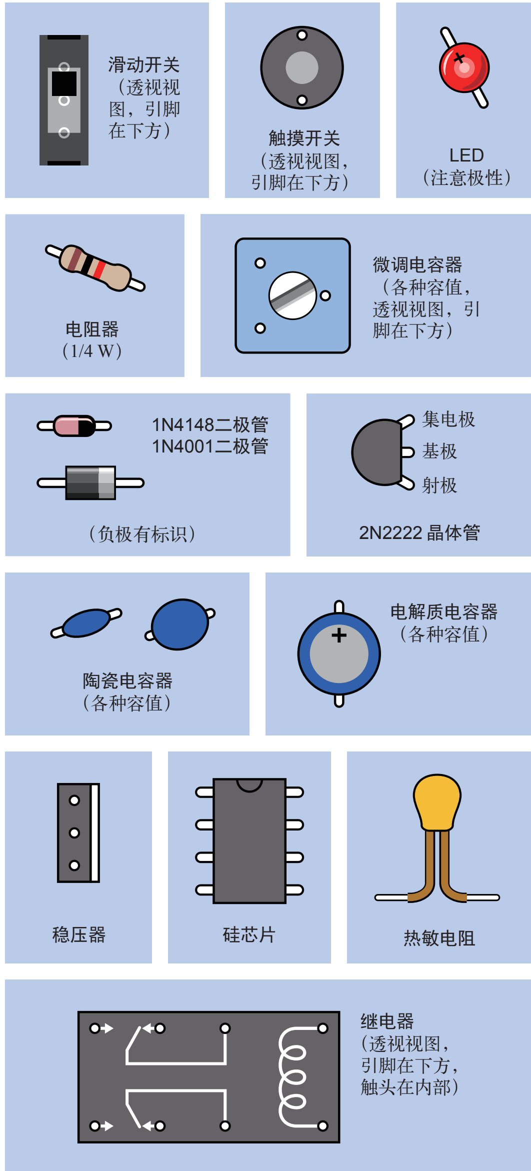


图 2-63　面包板元件的表示符号

如前文所述，我建议你自己制作跨接线。我制作跨接线的具体流程如图 2-64 所示。首先，从一些连接线上剥下几英寸绝缘层。用左手握住导线（如果你惯用左手，就用右手握住导线）。用另一只手握住剥线钳。合拢剥线钳，让钳刃上标有“22”的小孔夹住导线。拉动剥线钳，它会将导线的绝缘层一起剥除。（不明白为什么使用“22”的小孔？这是因为你使用的是 22 线规的导线。至少我希望这是你正在使用的尺寸。）

下一步，估计一下当导线插在面包板上时，露出的部分有多长。设这一段的长度为 *X* 英寸。在连接线剩余的绝缘层上量出 *X* 英寸，将这段长 *X* 英寸的绝缘层拉到距导线末端约 3/8 英寸的地方。

使用剪线钳或剥线钳的钳刃剪去移动完毕的 *X* 英寸绝缘层后方 3/8 英寸处的导线。

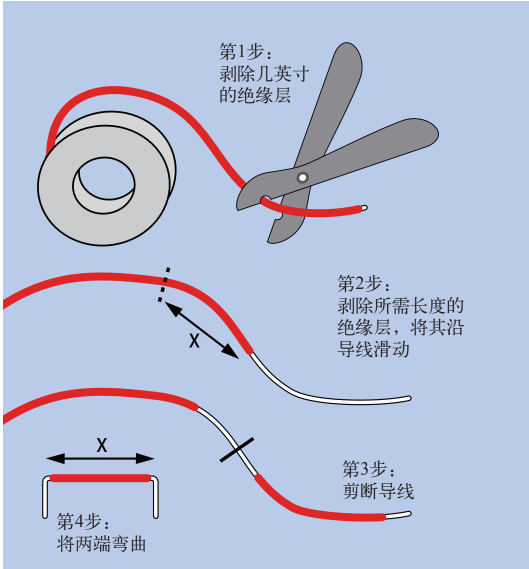


图 2-64　制作跨接线的流程

最后，用钳子在导线的两端各弯出一个整齐的直角，把跨接线插入面包板中。稍等——是不是不太合适？经过一点练习，你就能很快通过目测做出长度适合的跨接线。

通电

最后，你需要用 9V 电池给电路供电。你应该发现，与连接器相连的导线末端是赤裸的焊接线，能够插入面包板上的小孔中。如果不容易插入，试试用钳子尖把导线捅进去。如果依然有困难，可能需要用剥线钳再剥除几毫米的绝缘层。

把导线插入面包板之后，将连接器紧扣在电池上，如图 2-62 所示。只要面包板一通电，左侧的 LED 就会亮起。按下按钮，继电器内部的开关会闭合，右侧的 LED 会点亮。祝贺你！你做成了第一个面包板电路。

那么，这个电路为什么能工作呢？

面包板内部结构

图 2-65 展示了面包板内部隐藏的铜线。小正方形表示元件引脚可以插入，与内部的铜线接触。

两条长长的竖直铜线，每一条都是**总线**（bus）。虽然也叫 bus，但它运送的不是旅客，而是电子，因为电源的正负极一般都与总线相连。

本书中，我一直把电源正极连到左侧的总线，把电源负极连到右侧的总线。

有一件重要的事情需要注意：每根总线中间都有两个中断。并非所有的面包板都有这一特点，但是大多数面包板确实如此。这两个中断意在允许你在面包板上不同的位置使用多个电压不同的电源。实际上，我们通常用不到多个电源，而总线上的中断也确实令人恼火，因为你可能会忘记那里还有个中断。当你沿着整块面包板搭建好电路后，可能突然发现中点标记上神秘地断了电，最后你才意识到自己忘记了在总线的中断上搭接跨接线。

在必要的时候，我会提醒你注意这个小细节。

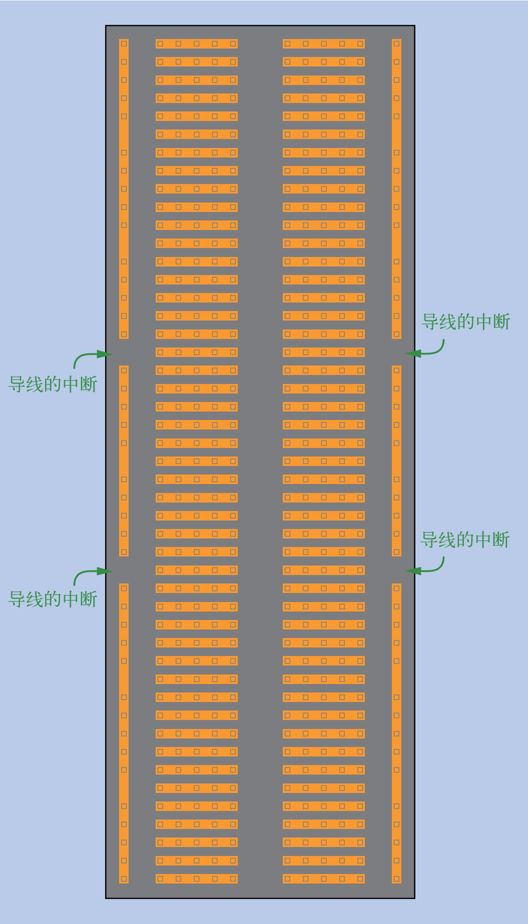


图 2-65　单总线面包板包含铜连接线

继电器电路揭秘

图 2-66 展示了面包板内部隐藏的铜线。它们在插入面包板的元件之间形成连接。电流的路径呈“之”字形，但是由于铜线的电阻很小，因此线路的长度无关紧要。

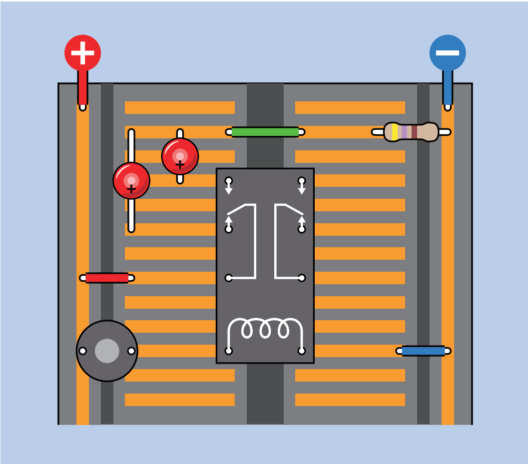


图 2-66　面包板上的元件通过其内部的铜线连接在一起

如果我把用不到的铜线隐藏起来，只画出连入电路的一部分铜线，也许电路图会更容易理解，如图 2-67 所示。

现在看一看图 2-68 中同一个电路的电路图。我把电路图画得像面包板上的样子，以强调相似性。随着本书内容的深入，我的讲解将更依赖电路图，并期望你能创建自己的面包板电路图，但这还需要一段时间。

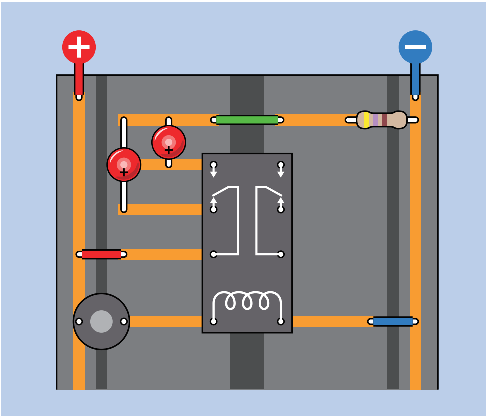


图 2-67　对前一个电路图经行简化，省略未连入电路的铜线

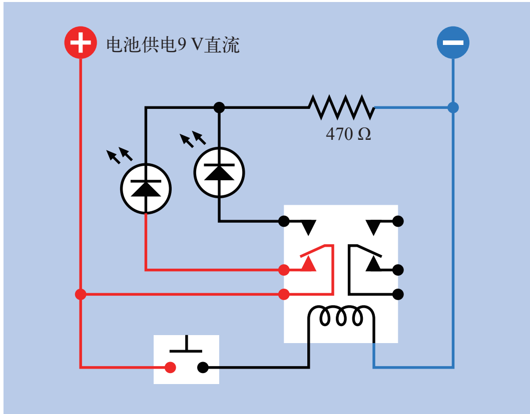


图 2-68　与面包板线路连接相对应的电路图

为何只有一个 470 Ω 的电阻器来保护两个 LED 呢？因为每次只有一个 LED 点亮。

使电路发出蜂鸣音

下一步是修改电路，使它更有趣。看一看图 2-69 中的新电路图，将它与图 2-68 中的旧版本相比较。你能发现其中的差异吗？在旧电路图中，给线圈供能的按钮开关直接从 9 V 电源处获得电能。新电路图中，按钮通过继电器的下触点获得电能。这样会有什么效果呢？

图 2-70 展示了如何修改原有的面包板电路以匹配新的电路图。你需要做的只是将按钮旋转 90°，再增加一根跨接线（图中的绿色线），把按钮和给左侧 LED 供能的继电器引脚连接起来。

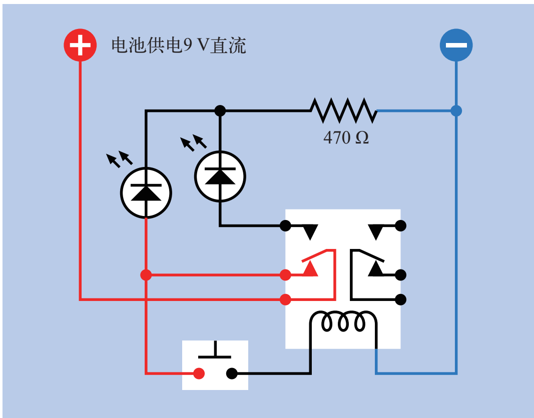


图 2-69　修改后的电路图，现在通过继电器的下触点向按钮开关输送电能

短暂地按下按钮，发生了什么？继电器发出了蜂鸣声。（如果你的听力不好，可以触摸继电器，感觉它的振动。）

你知道这里发生了什么吗？在松弛状态下，继电器内部的开关靠在继电器的下触点上。这样就为左侧的 LED 以及按钮开关提供了正电压。因此，在按下按钮时，电能就进入继电器的线圈。线圈推动继电器内部的开关向上运动。然而，它一旦这样做，就破坏了连接，使线圈失去了供电电压，开关落回松弛位置。但是，它回到原位后，又给线圈提供了电能，从而使这个循环一直重复。

继电器在两个状态间来回振荡。

因为你使用的是小继电器，所以它的开关速度很快。实际上，它每秒振荡约 20 次（这个速度太快，LED 来不及显示正在发生什么）。

继电器被迫振荡时很容易烧坏，或者损坏触点。电路中的电流也略大于触摸开关的设计最大电流。所以不要长时间按压按钮！为了降低电路的自毁能力，我们需要使一切发生得更慢些。我将用电容器来实现这个效果。

增加电容器

如图 2-71 电路所示，增加一个 1000 μF 的电解质电容器，与继电器线圈平行，并确保电容器的短引线与电路的负极一侧相连，否则电容器无法工作。除了短引线，你还应该在电容器外壳上找到一个减号，这个用来提醒你电容器的哪一侧应该连接负电。我在电路图中使用的是加号，因为它比减号更加醒目，而且我希望它与 LED 使用的表示方法相一致。

电解质电容器如果连接错误，反应将会十分糟糕。它们可能会自毁。电容器的极性一定要检查两遍。

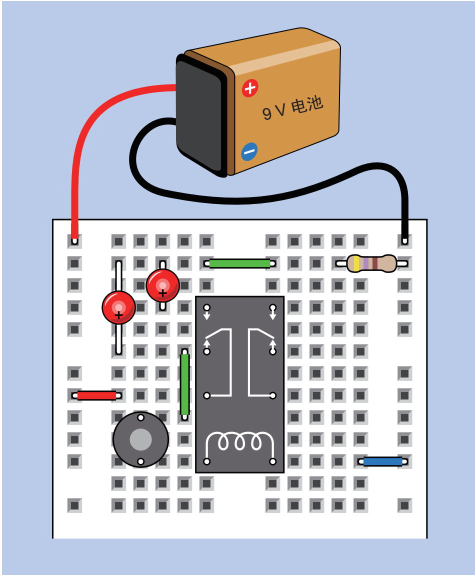


图 2-70　前面的面包板电路经过了修改，以匹配修改后的电路图

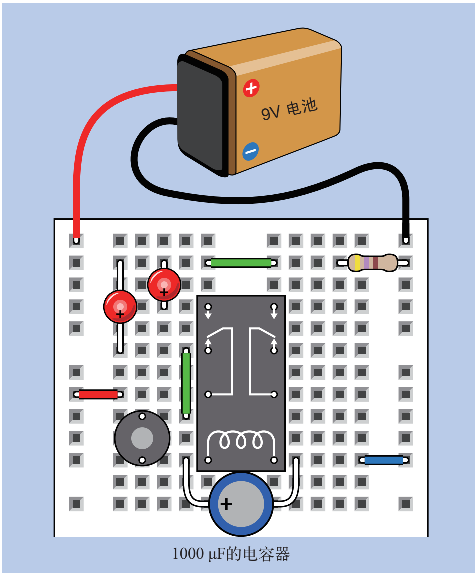


图 2-71　加入大电容后，电路的响应速度减慢

现在按下按钮，继电器会断断续续地发出咔哒声，而不是蜂鸣声。

电容器就像一个小型可充电电池。它如此之小，用几分之一秒的时间就能充满电，继电器还来不及断开触点。然后，在触点断开时，电容器把电能释放给继电器（和左侧的 LED），使得继电器线圈暂时通电。电容器耗尽储存的电能后，继电器开关松弛，重复这一过程。

这一过程中，电容器在**充电和放电**。

断开右侧 LED 的连接，就会发现，左侧的 LED 以一种奇妙的方式闪烁着，它的亮度随着电容器电压的降低而逐渐减弱。

因为电容器在充电时会产生很大的浪涌电流，所以在实验中，如果将触摸开关按下的时间太长，它可能过热。

基础知识：关于法拉

电容器的存储能力以**法拉**计量，用大写字母 F 表示。法拉由迈克尔·法拉第（Michael Faraday）命名，他是又一位历史留名的电学先驱。

法拉是一个很大的单位，分成微法（μF，1μF 等于 1F 的百万分之一）、纳法（nF，1nF 等于 1 μF 的千分之一）和皮法（pF，1pF 等于 1nF 的千分之一）。在美国，纳法这个单位用得不如欧洲多，容值可能用皮法或几分之一微法来表示。

皮法、纳法、微法、法拉的转换关系如图 2-72 所示。

皮法	纳法	微法	法拉
1 pF	0.001 nF	0.000 001 μF	
10 pF	0.01 nF	0.000 01 μF	
100 pF	0.1 nF	0.0001 μF	
1000 pF	1 nF	0.001 μF	
10 000 pF	10 nF	0.01 μF	
100 000 pF	100 nF	0.1 μF	
1000 000 pF	1000 nF	1 μF	0.000 001 F
		10 μF	0.000 01 F
		100 μF	0.0001 F
		1000 μF	0.001 F
		10 000 μF	0.01 F
		100 000 μF	0.1 F
		1000 000 μF	1 F

图 2-72　法拉的单位转换表

注意：小心电容器造成伤亡

如果一个较大的电容器充有很高的电压，它可以将该电压保持数分钟甚至数个小时之久。由于本书的电路使用的电压较低，因此你现在不用为这个问题担忧。但是如果你粗心大意，拆开一台老电视机，在里面翻来找去（我不建议你这么做），你就可能会遭遇飞来横祸。一个充满电的大电容器把你电死，就像你把手指伸进电源插座一样容易。

基础知识：关于电容器

电容器内部不存在电连接。它的两根引线在内部与两块**极板**相连，极板之间间隔一定距离，中间用称为**电介质**的绝缘体隔开。因此，直流电无法通过电容器。但是，如果你把电容器连接在电池两端，它就会开始充电，如图 2-73 所示，因为一块极板上的电荷吸引另一块极板上相反的电荷。

现代电容器中，极板已经缩减成有弹性的金属薄膜。

两种最常见的电容器是陶瓷电容器（非常小，储存电荷量较少）和电解质电容器（要大得多）。电解质电容器通常做成小金属罐的形式，颜色可能有很多种，但黑色是最常见的。老式陶瓷电容器通常是圆盘形，而新式的电容器是小水滴形的。

陶瓷电容器没有极性，这意味着你不必担心它们应该如何连入电路。电解质电容器有极性，只有正确连入电路才能工作。

电容器的电路符号有两条线，代表两片极板。如果两条线都是直的，那么电容器就没有极性，可以用两种方式连接。如果一条线呈弧形，那么电容器的这一侧就必须连接到比另一侧更低的电势上。符号还可能包含一个 + 号，提醒你电容器的极性。图 2-74 所示为两种符号。

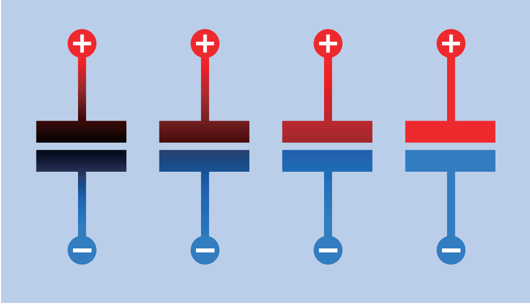


图 2-73　连接到电池两端的电容器会吸引等量的相反电荷，如图所示

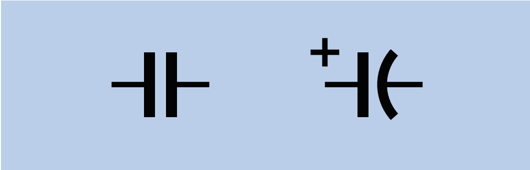


图 2-74　表示电容器的两种符号

带弧线的符号已经不常使用了。人们认定，如果你有电解质电容器，那你就会将它连接正确。而且，高容值的多层陶瓷电容器已经生产出来，可能替代电解质电容器。

- ❒ 我的电路图只会用到无极性的电容器符号。使用电解质电容器还是陶瓷电容器取决于你的选择。
- ❒ 我的面包板电路图会在最可能用到的地方画出电解质电容器。但是，你也可以用陶瓷电容器来替代它。

注意：观察电容器的极性！

最常见的电解质电容器使用铝极板。另外两种电容器分别使用钽和铌极板。这些电容器都对极性十分挑剔。在图 2-75 中，一个钽电容器插在面包板上，错误地连接到了一个能够输出很大电流的电源上。过了一分钟左右，电容器造反了，砰的一声炸开，燃烧的碎片到处散落，一直烧到面包板里面。我们由此得到了一个教训：要注意电容器的极性！

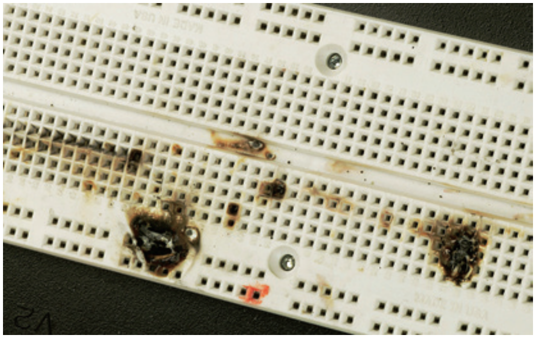


图 2-75　有极性的钽电容器错误连接到能提供大电流的电源两端，造成恶果

基础知识：故障追踪

随着你在面包板上搭建的电路增多，电路越来越复杂，错误就越有可能发生。没有人能从这个不幸的事实中幸免。

一个常见的错误是将导线插入了面包板上错误的一排。当你使用继电器等类似的元件时，尤其容易犯这个错误，因为这些元件的引脚是隐藏的。通常我会把元件拿下来，再看一眼，再把它装回去，只是为了确认。

如果你忘记了面包板内部隐藏导线形成的连接，就会犯一个更微妙的错误。看一看图 2-76。还有更简单的电路吗？很显然，电源正极流出的电流流过 LED，流过跨接线，再流过电阻器，到达负极总线。但是如果你按照图中所示的方法连接它们，我绝对能保证，这个电路无法工作。

如果你交换电阻器和 LED 的位置，情况将变得更加糟糕。这一次，电路会立即烧毁 LED。

检查一下图 2-77 中电路的透视视图，答案就很明显了。问题在于，LED 的两根引脚都插到了面包板内的同一条导线上。电流有两种选择，或是流过 LED，或是直接流过铜导线——铜导线的电阻比 LED 的电阻小得多，因此大多数电子会流过导线，而 LED 一直不亮。

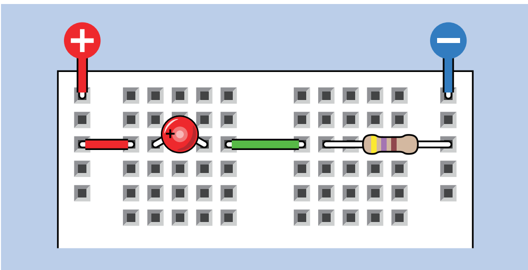


图 2-76　这个面包板电路不能工作。你知道为什么吗

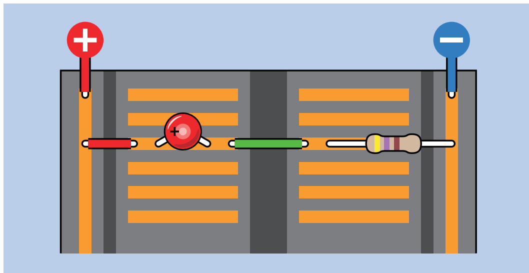


图 2-77　透视视图解释了该电路不能工作的原因

还有很多种其他的错误可能出现。你怎样才能以最快的速度最有效地发现它们呢？你只需要掌握一套方法。遵循以下步骤。

1. 检查电压。把万用表的红表笔放在面包板正极总线顶端的连接点上，设置万用表测量电压（直流电压，除非实验建议使用其他量程）。确保电路电源处于开启状态。现在，用万用表的黑色表笔触碰负极总线上的各个位置。你在万用表上读到的读数应该和电源电压相近。如果测到的电压接近于零，那么你很有可能忘了加入跨接线。没能把负极总线上的短路连接上。如果你测到几伏特的电压值，但比电源电压低得多，那么电路中某处就可能发生了短路，拉低了电源电压（如果你用电池供电的话）。

现在，把黑表笔固定在负极总线顶端的连接点上，从上到下检查一遍正极总线。

最后，仍然保持黑表笔位置不动，用红表笔检测电路中任意位置的电压。如果检测到电压接近于零，那么很可能某处漏掉了连接，或者某个元件 / 某根导线在面包板内部没有形成连接。

2. 检查布局。确保所有的跨接线和元件引脚在面包板上的位置都与预定的完全一致。

3. 检查元件方向。有极性的二极管、晶体管和电容器必须正确连接。使用集成电路芯片时（本书后面会讲到），检查一下它们的方向是否正确，并确保芯片上所有的引脚都没有弯曲，不会藏在芯片下面。

4. 检查连接。元件可能在面包板内部接触不良，这种情况很少发生，但并非绝无可能。如果电压出现无法解释的间歇性错误或者零电压，就试试更换一些元件的位置。根据我的经验，如果你购买了非常便宜的面包板，或者使用了小于 22 线规的导线，出现连接问题的概率会更大。（记住，线规的编号越大，导线越细。）

5. 检查元件值。核实所有的阻值和容值，保证正确。我的标准流程是先用万用表检测一下阻值，再把它连入电路。这要费事一些，但从长远来看，还是能节省时间。

6. 检查有无损坏。集成电路和晶体管可能因电压不正确、极性不正确或者静电而损坏。在手头存一些备件，可以用作替换。

7. 检查自己。如果其他方法都没有生效，就先休息一会儿。长时间着迷于工作会使视野变得狭隘，从而阻碍你发现错误。如果转移一会儿注意力再回到你的问题上，答案可能突然就显而易见了。

建议你把这个错误追踪流程表加上书签，日后如果再出现问题，可以回来查阅。

背景知识：迈克尔·法拉第和电容器

如前文所述，法拉是以迈克尔·法拉第的名字命名的。法拉第（1791—1867），英国化学家和物理学家，肖像见图 2-78。

虽然法拉第受的教育不多，数学知识也非常少，但是他给装订工人做了七年学徒，期间阅读了大量书籍，能够自学。而且，在他所生活的时代，相对简单的实验就能揭露电的基本特性。他有几项重大的发现，包括电磁感应，这一发现引导了电动机的发明。他还发现，磁力能影响光线。

他的工作为他赢得了巨大的荣誉，而他的肖像也于 1991~2001 年印刷在 20 英镑的纸币上。

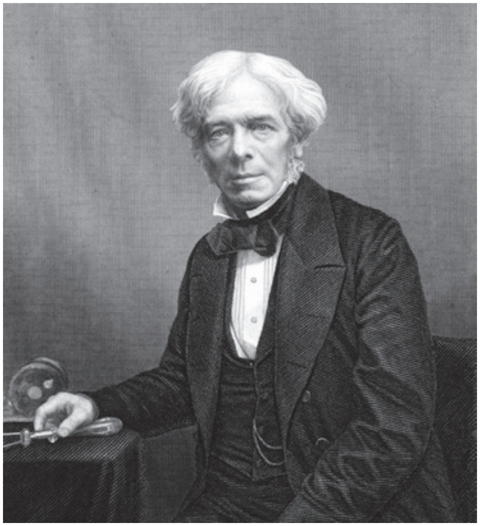


图 2-78　迈克尔•法拉第，法拉因他而得名

实验 9：时间与电容器

电子能够以接近光速的速度运动，但我们仍然可以使用它们以秒、分钟甚至小时为单位测量时间。这个实验将向你展示如何测量时间。

需要的物品

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表
- ❒ 9 V 电池和连接器 1 个
- ❒ 触摸开关 2 个
- ❒ 通用 LED 1 个
- ❒ 电阻器：470 Ω、1 kΩ、10 kΩ 各 1 个
- ❒ 电容器：0.1 μF、1 μF、10μF、100 μF、1000 μF 各 1 个

给电容器充电

首先，设置万用表为测量直流电压，用万用表测量 9 V 电池的电压。如果电池电压小于 9.2 V，那么你需要用一块新电池进行本实验。

在面包板上安装两个触摸开关、一个 1 kΩ 电阻器和一个 1000 μF 电容器，如图 2-79 所示。使用几根测试引线连接万用表，这样就可以测量电容器两引脚之间的电压，同时不占用双手。

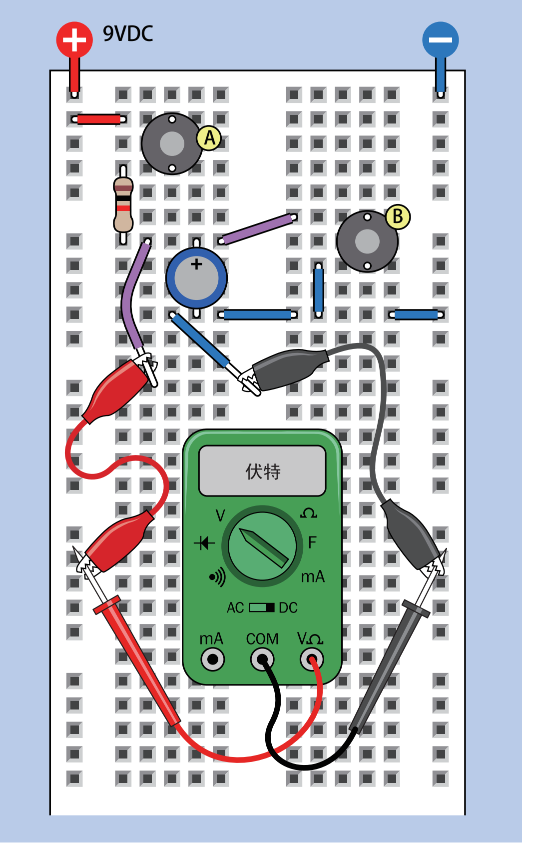


图 2-79　电容器充电的简单电路。电容器容值为 1000 μF，电阻器为 1 kΩ

把连接器紧扣在电池上，导线插入面包板，向面包板的两根总线提供 9 V 直流电，左侧总线连接电源正极，如图所示。

如果万用表测得的电压大于 0.1V，就按压 B 按钮，让电容器的两侧短接，从而使其放电。

图 2-80 中的电路图展示了相同的电路，能够帮助你了解原理。

现在按住按钮 A，用手表、钟表或手机计时，看电容器充电到 9 V 需要多少秒。如果你使用的是自调量程万用表，随着电荷的增加，它应当自

动从一开始的测量毫伏变化为测量伏特。我做这个实验时，万用表完成变化只用了 3 秒。

随着越来越多的电子空穴和电子被吸引到电容器的两个极板上，电容器的正极板变得更“正”，负极板变得更“负”了。电流不能通过电容器，因此电容器两引脚间的电势差增加。在任何一本入门电子学教材中，你最先看到的一条结论就是：

电容器阻碍直流。

只要你给电容器两端施加稳定的电势差，就能得到这个结论。

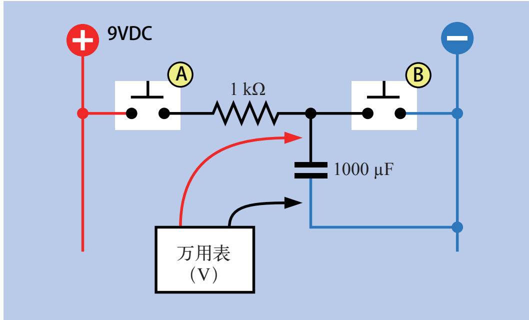


图 2-80　这张电路图和上面的面包板电路图展示的是同一条电路

RC 网络

拆下 1 kΩ 的电阻器，换上 10 kΩ 的电阻器。如果万用表显示电容器两端仍有电压，就按住按钮 B 给电容器放电。

现在重复测试。电容器通过 10 kΩ 的电阻器充电到 9 V 需要多长时间？

电容器和电阻器的简单组合称为 *RC* 网络（*R* 代表电阻器，*C* 代表电容器）。这是一个非常重要的电子学概念。在我解释 *RC* 网络的原理之前，先考虑以下几个问题。

- ❒ 把 1 kΩ 电阻器换成 10 kΩ 电阻器后，电容器充电到 9 V 用的时间恰好是原来的 10 倍吗？
- ❒ 电容器两端的电压是匀速增加，还是先快后慢或者先慢后快？
- ❒ 如果等上足够长的时间，电容器两端的电压会达到电池电压的初始测量值吗？

电压、电阻和电容

把电阻器想象为一个限制水流的水龙头，把电容器想象成一个等待灌满的气球（见图 2-81）。如果你拧紧水龙头，只让水一滴滴地流出，气球灌满的时间就要长一些，但是只要你等的时间足够长，很小的水流也能灌满气球。假设气球不会爆炸，那么当气球内部的压力等于供水管中的水压时，这个过程就会结束。

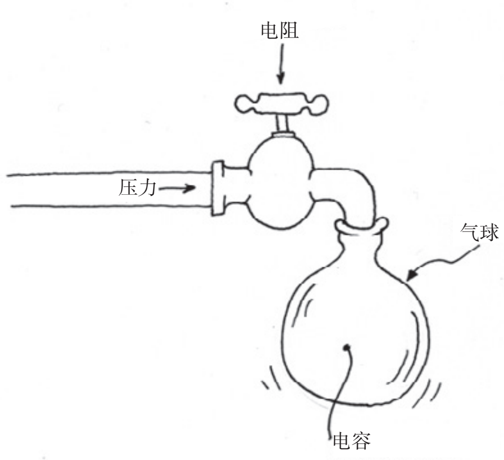


图 2-81　流进电容器的电子就好比流入气球的水

但是这种描述遗漏了一个重要的因素。随着气球充满水，它会伸长，对内部的水施加更多的压力。随着气球内部压力增大，水的流入会受阻。因此，在这个过程中，我们可以预计水流的速度减慢。

这个过程是如何与电子流入电容器的过程相类比的呢？概念很简单。起初，电子源源不断地涌入电容器，但是随着它们占据越来越多的电子空穴，新进入的电子就需要更长时间才能找到位置。充电的速度因此变得越来越慢。实际上，理论上讲，电容器两端的电压永远无法达到充电电压。

背景知识：时间常量

电容器的充电速度以“时间常量”函数计量。时间常量的定义很简单：

$$T = R \times C$$

T 单位为秒，是电容器的容值为 *C*（单位为法拉）通过阻值为 *R* 的电阻器充电所用的时间常数。

回到第一次测试的电路，使用 1 kΩ 的电阻器，我们可以把各个元件的值代入时间常数公式中——但是要把单位转换成欧姆和法拉。1 kΩ 是 1000 Ω，1000 μF 是 0.001 F。这样计算就很容易了。

$$TC = 1000 \times 0.001$$

因此，对于所取的阻值和容值，*TC*=1。

但是 *TC* 究竟有什么意义呢？它是不是指电容器在一秒钟内就能充满电呢？很遗憾，并不是那么简单。

❒ 时间常量 *T* 是电容器从 0V 开始至获得所供给的电压的 63% 所需的时间（秒）。

如果电容器的初始电压不是 0V，又会怎么样呢？如果我们测量的时候电容器已经获得了初始电压，定义就有些复杂了。设 VDIF 是电容器两端电压和电源电压的差值，*T* 就是电容器在已有电荷基础上，增加 VDIF 的 63% 电压所用的时间。

（为什么是 63%，而不是 62%、64% 或 50% 呢？这个问题的答案对于本书来说过于复杂了，如果你想了解更多关于时间常数的知识，就需要去查阅其他资料。准备好学习微分方程。）

也许打个比方会有助理解。图 2-82 画了一个贪吃的人，他正准备吃一块蛋糕。一开始，他实在饿极了，于是他切下 63% 的蛋糕，1 秒钟吃完了它，1 秒钟就是他吃蛋糕的时间常量。第二次吃的时候，他切下了剩余蛋糕的 63%——他不再觉得那么饿了，他吃下这块蛋糕又用了 1 秒钟（记住，这是他的时间常量）。第三次，他再切下剩余蛋糕的 63%，仍然用 1 秒钟吃完，以此类推。他逐渐吃下整块蛋糕，就如同电容器逐渐充满电子。但是他永远吃不完整块蛋糕，因为他只取剩余蛋糕的 63%。

图 2-83 以另一种方式展示了这个过程。在每个时间常量（若使用的是 1000 μF 电容器和 1 kΩ 电阻器，常量就为 1 s）之后，电容器的电压都会增加它原有电压和电源电压差值的 63%。

在一个使用理想元件的理想世界里，电容器的充电过程将永远持续。在现实世界里，我们专横地规定：

五个时间常量之后，电容器上的电荷接近 100% 充满，可以认为充电完成。



图 2-82　如果这个贪吃的人总是只吃掉盘子上蛋糕的 63%，他填饱肚子的方式就和电容器充电的方式一样。无论他吃多长时间，蛋糕总是吃不完，他的肚子也不能完全填饱

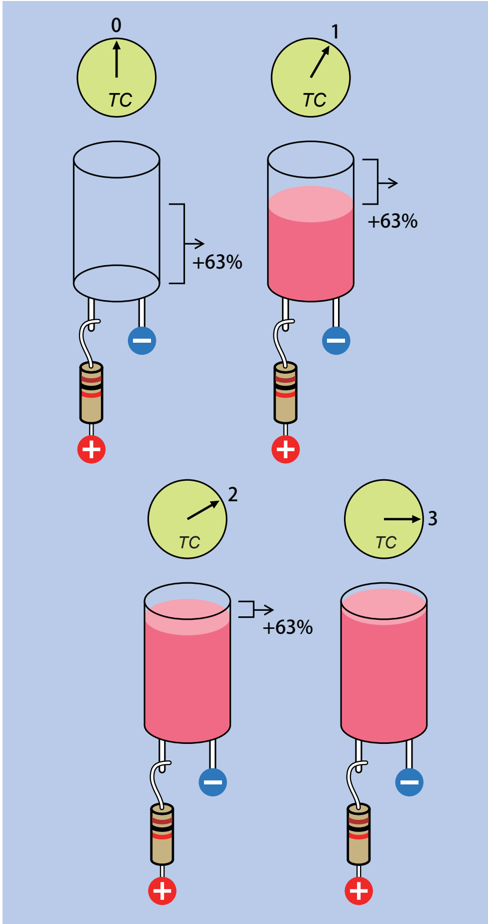


图 2-83　电容器充电的另一种理解方式

背景知识：绘制曲线图

我想画出一条曲线图，展示电容器两端电压随电容器充电的变化情况。为此，我将使用时间常量公式计算数据。

设 V_{CAP} 是电容器两端当前的电压，而 V_{DIF} 是该电压与电源电压的差值（同前）。下面的公式将告诉我一个时间常量之后，电容器两端的电压是多大。设这个新电压值为 V_{NEW}。公式如下：

$V_{NEW} = V_{CAP} + (0.63 \times V_{DIF})$

0.63 即 63%。

设电池电压为 9 V，电容器起始电压为 0 V。则 $V_{CAP} = 0$，$V_{DIF} = 9$。将以上数值代入公式：

$V_{NEW} = 0 + (0.63 \times 9)$

计算器得到 0.63×9 = 5.67。因此，在一个时间常量（1 s，R = 1 kΩ，C = 1000 μF）之后，电容器两端的电压达到 5.67 V。

下一秒情况如何？我们需要使用新的值重复计算。电容器两端的电压 V_{CAP} 现在为 5.67 V，电池电压仍为 9 V，因此 V_{DIF} 等于 9 减去 5.67，即 3.33。将这些值代入同一个公式：

$V_{NEW} = 5.67 + (0.63 \times 3.33)$

计算器得到 0.63×3.33 ≈ 2.1，而 2.1 + 5.67 = 7.77。因此，两秒钟后，电容器获得了 7.77 V 电压。

我们可以计算多次，得到一系列结果（保留两位小数），它们是电源电压为 9 V 时，每秒末电容器两端的电压：

1 秒后：5.67 V
2 秒后：7.77 V
3 秒后：8.54 V
4 秒后：8.83 V
5 秒后：8.94 V
6 秒后：8.98 V

图 2-84 中的曲线是根据上述数值绘出的平滑曲线。6 秒钟以后的值我没有计算，因为它们已经十分接近 9 V。

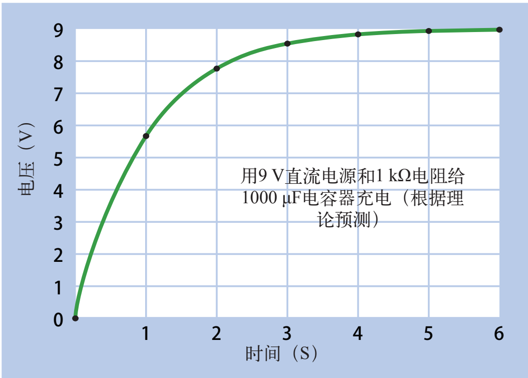


图 2-84 曲线图能够显示电荷在一段时间内如何积累到电容器上

实验验证

我已经讲过如何计算 *RC* 网络中的电容器电量。但是你怎么知道我讲的对不对呢？应不应该直接相信我呢？

也许你应该自己测试一下。也就是说，你可以进行实验验证，这是发现学习法的重要组成部分。

回到你原先使用的电路，并确定电路里连接的是 10 kΩ 而非 1 kΩ 的电阻器。找个朋友坐在你旁边计时，你自己观察万用表上的电压示数。每隔 10 秒钟，朋友就说一声“好”，你则记录下此刻万

用表显示的电压。整个过程持续大约一分钟。

因为你使用的是 10 kΩ 而非 1 kΩ 的电阻器，所以时间常量是 10 秒钟，而不是 1 秒钟。因此，你的读数应该和上文中我每隔一秒的一系列读数相似，只是时间间隔为 10 秒。

你测得的电压值应当与我测得的电压值相近，但不会完全一致。为什么呢？我能想到很多原因。

- 你的电池提供的电压与我的电池不完全一致。
- 你的电阻器的阻值不是恰好为 10 000 Ω。
- 你的电容器的容值不是恰好为 1000 μF。
- 你的万用表并不完全精确。
- 你在万用表上读数要用几微秒。
- 你的朋友不一定能完全精确地隔 10 秒钟提示一次。

还有两个因素你可能想不到。首先，电容器不能完美地储存电能。它们会**漏电**，逐渐漏掉其中的电荷。甚至在电容器充电时，漏电也在发生。在充电过程快结束时，电子流入的速度十分缓慢，与之相比，漏电现象（电子流出的速率）就十分显著了。

另外，你的万用表还有一定的内阻。它的阻值很高，但也客观存在。这就意味着在你测量电压时，万用表会从电容器上拿走一点电荷。于是测量过程就改变了你要测量的值！这确实是物理学和工程学面临的一个共同难题。

我可以想出很多方法来减小这些因素的影响，却无法彻底消除它们。实验误差总是存在，这是用实验验证理论时需要面临的挑战。理论的验证可能是一个很长的过程，需要很大的耐心——这就是理论家与实践者性格常常不同的原因。

电容耦合

既然已经讲过了电容器的充放电原理，我们就要回到前文得出的结论：

> 电容器阻碍直流。

你可能还记得，我说过："只要你给电容器两端施加稳定的电势差，就能得到这个结论。"

但是如果没有稳定的电势差，会怎么样？空电容器接上电源上的一瞬间会发生什么？

啊，这就另当别论了。在这些情况下，电容器会**允许信号通过**。

这怎么可能呢？电容器的两个极板互相不接触，电流怎么能从一片极板跳到另一片极板上呢？

我将在稍后解答这两个问题。首先，你需要确信我所说的现象确实会发生。

看一看图 2-85 中面包板上的元件，它们的布局与图 2-79 中的电路很像，但是 10 kΩ 的电阻器从左侧移到了右侧，还增加了一个 LED 和一个 470 Ω 的电阻器。

图 2-86 是面包板电路的电路图，可以帮助解释说明。

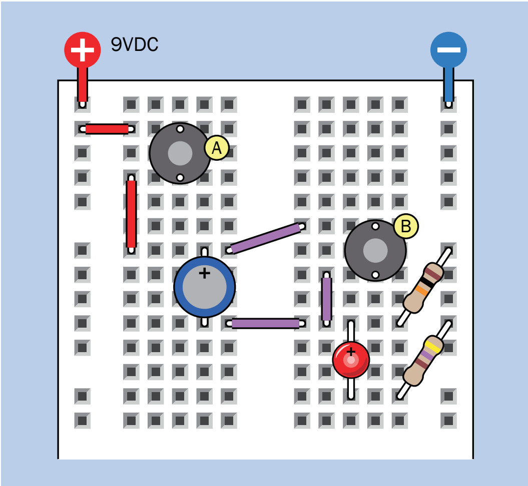


图 2-85　红色 LED 的闪烁显示了当电压迅速改变时，电容器响应的变化

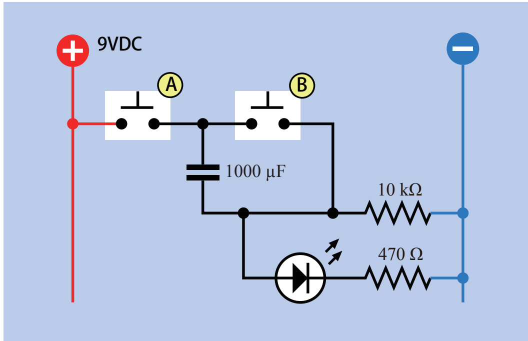


图 2-86　图 2–85 中面包板电路的电路图

为避免混淆，我在图 2-87 中列出了各元件的值。

搭建好电路后，首先要记得按下按钮 B 给电容器放电。接着按下按钮 A——为什么 LED 开始闪烁，之后逐渐变暗了？

再次按下按钮 A。这一次几乎什么都没有发生，很明显，电容器刚才已经放电完毕，现在开始充电了。那么，再次按下按钮 B 来给电容器放电。现在再按下按钮 A，LED 又开始闪烁。

我们知道，电容器的下引脚上一开始几乎没有正电压，因为它通过 10 kΩ 电阻器连接到了负极。我们还知道，电容器的上引脚一开始也几乎没有正电压，因为按钮 B 把电容器的两个极板短接了。（这就是我让你给电容器放电的原因。）

然后你按下了按钮 A，它突然施加了一个正脉冲，电容器另一侧的 LED 点亮。通过 LED 的电流一定是从某个地方来的，而唯一的解释就是它来自电容器。

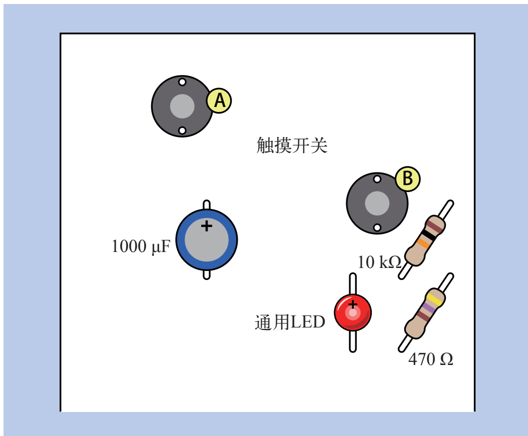


图 2-87　面包板电路的元件值

位移电流

让我们再试一试，把 LED 和串联电阻器换成万用表。图 2-89 展示了面包板布局，图 2-88 展示了电路图。按下按钮 B 给电容器放电，然后检查一下万用表的读数，应该为接近 0 V。

在按下按钮 A 的同时，仔细观察万用表。数字万用表的响应速度不太快，但在电压逐渐下降之后，你仍能发现电压骤然上升。

当我把示波器（可以测量和显示非常迅速的电压变化）连接到电路上时，显示出的波形看起来很像我在图 2-89 底部添加的曲线。电压上升得如此迅速，仿佛就在一瞬间。

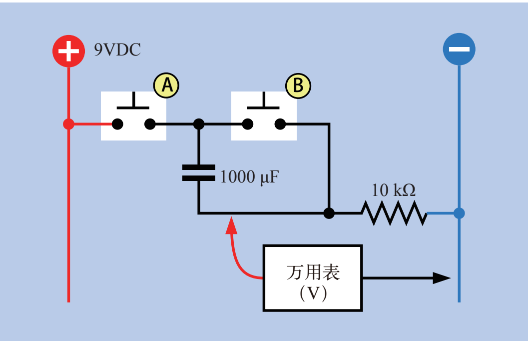


图 2-88 前述面包板电路的电路图

瞬间变化的电压能够通过电容器，这一点我们已经熟知，电子学也经常用到这个原理。但这是为什么呢？

这个现象引起了一位早期的实验者詹姆斯·麦克斯韦（James Maxwell）的兴趣，他觉得这一切无法用当时公认的理论来解释，于是他建立了一门理论，并创造了一个短语来描述他看到的现象。他称之为**位移电流**。这个名称与他当时正在研究的一些理论很契合。

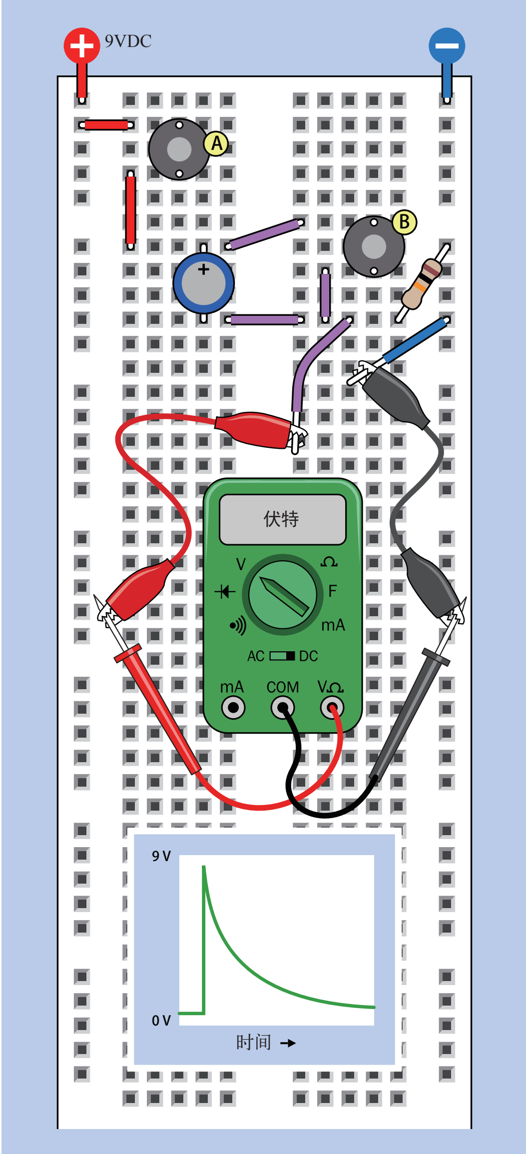


图 2-89 万用表替换了前一个电路中的 LED 和 470Ω 串联电阻

今天，又有其他理论出现。很明显，电流的涌入在电容器内部引发了场效应，场效应可以在一对极板上产生电压。但是这个理论很快就变得十分复杂，大多数教材的讲解都很简略——电容器会阻碍直流，而允许波动的电压通过。”

如果换上一个更小的电容器，你就会发现，它允许更短暂的脉冲通过。取下万用表，把 LED 和 470 Ω 串联电阻连回电路，分别连入 100 μF、10 μF、1 μF 和 0.1 μF 的电容器。连入最小的电容器时，LED 几乎不闪烁。

交流电

如果你把电路反向连接，虽然电流从相反的方向流入，但电路仍能工作。图 2-91 展示了反向连接后的电路，10 kΩ 电阻器移到了左侧，按钮 A 移到了右侧。万用表仍然测量电阻器和电容器之间一点的电压。图 2-90 展示了同一个电路。

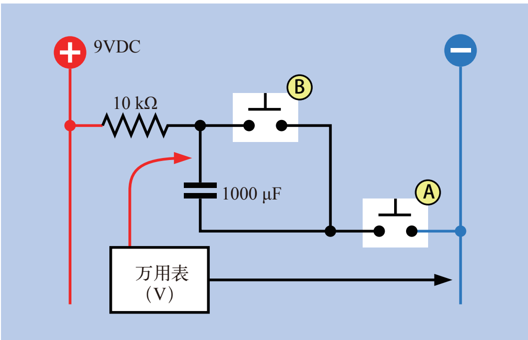


图 2-90　前述面包板电路的电路图

按下按钮 B 再松开，给电容器放电，此时万用表的读数约为 9 V 直流，电容器的上引脚通过 10 kΩ 电阻器连接到了正极总线。电容器隔断直流，因此阻值约等于无限大，正电荷便“无处可去”。图 2-92 展示了两个电阻器之间一点的电压如何随着该点与地之间阻值的增大而上升，从而解释了这个现象。

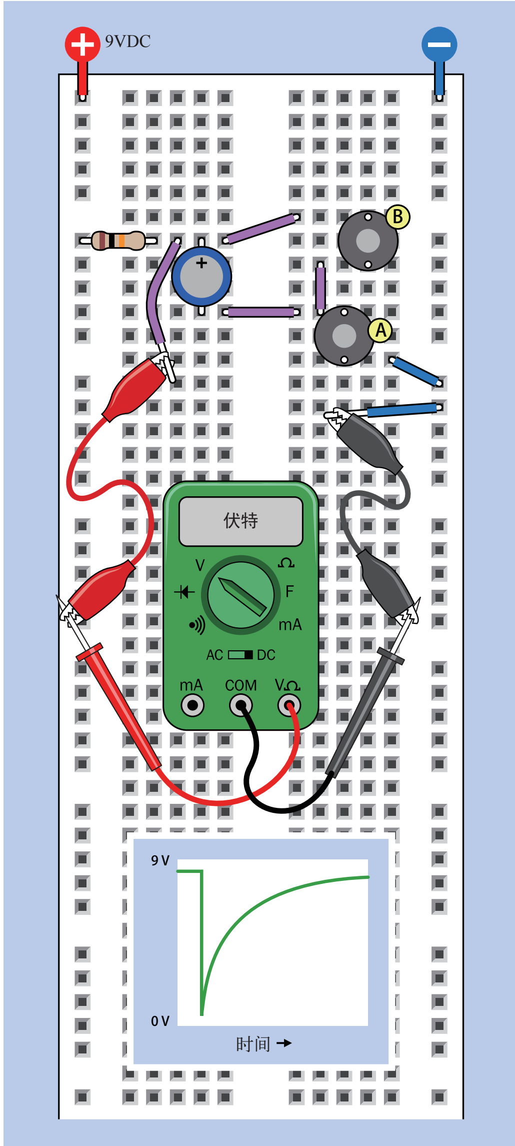


图 2-91　修改了前一个电路，电压反相

但是，当你按下面包板电路中的按钮 A 时，就产生了一个负脉冲。随着负脉冲通过电容器，电容器的等效电阻暂时消失，使得万用表的读数下降。然后，电容器缓慢充电，过程与本实验的第一次测试相同。

图 2-91 中的曲线图大致显示了电容器上电荷的变化情况。

- ❒ 电容器能阻碍直流。
- ❒ 电容器允许通过短暂的波动电流，无论电流方向如何。
- ❒ 之后，电容器积累电荷，过程如我在实验开始时所述。

这就引出了一个重要的结论。因为交流电（AC）是在正负之间迅速变换的一连串脉冲，所以电容器会允许它通过。

电容器的尺寸非常重要。用小容值的电容器进行同一个实验，你会发现它只会作出短暂的响应。小电容器能够通过高频的波动电流，同时又阻碍低频的波动电流——这一特性得到了很多应用，包括用于音频。在实验 29 中，你将自己尝试这一应用。记住，音频信号也是一种交流电，因为它们的变化速度很快。

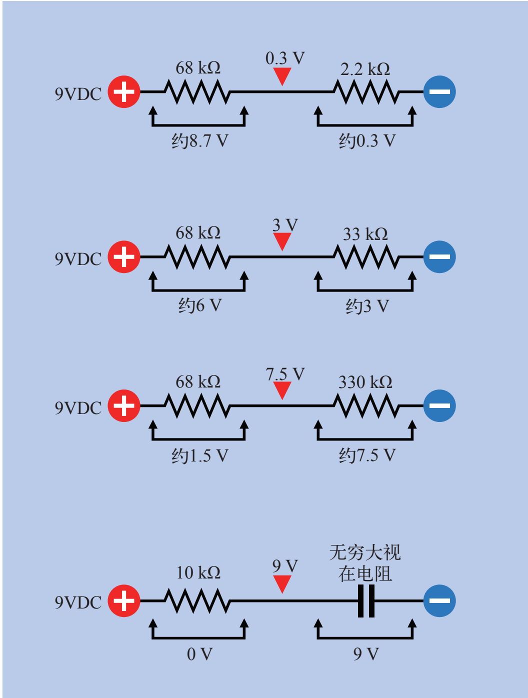


图 2-92　两个电阻器串联，左侧的电阻器连接电源，右侧的电阻器接地（负极），两电阻器之间的电压随着右侧的电阻器阻值升高而上升。电容器对于直流的有效电阻几乎为无穷大

当电容器连入电路用来通交阻直时，我们就称它为**耦合电容**。它可以允许信号从电路的一部分传递到另一部分，同时阻碍信号的直流电压，信号的两部分电压可能截然不同。在实验 11 中，我将使用这个概念。

实验 10：晶体管开关

既然你已经了解了电容器的特性，我就讲解另一个基本元件：晶体管。学习了晶体管的工作原理后，就可以探究电容器和晶体管是如何配合工作的。

需要的物品

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表

- ❐ 2N2222 晶体管 1 个
- ❐ 9 V 电池和连接器 1 个
- ❐ 电阻器：470 Ω 2 个、1 MΩ 1 个
- ❐ 500 kΩ 微调电位器 1 个
- ❐ 通用 LED 1 个

手指实验

我将使用 2N2222 晶体管，它一直是应用最广泛的半导体元件（它由摩托罗拉于 1962 年发明，此后发展出多种样式，至今仍在生产）。

摩托罗拉 2N2222 晶体管的专利很久以前就已到期，因此任何一家公司都可以生产自己的晶体管。有些晶体管外面包有黑色塑料，而其他晶体管封装在小金属罐里。我在图 2-23 中展示了这两种晶体管。这两种晶体管都可以达到我们的目的。但是，请注意前面我提出的关于部件编号的注意事项（参考本章必要工具：晶体管一节）。编号同为 2N2222 的晶体管各不相同，你需要使用正确的型号。

将晶体管、LED 和一个 470 Ω 的电阻器插入面包板，如图 2-93 所示。确定 LED 的长引脚向左，遵循 + 号的指示。然后确定晶体管的平坦一面朝向右侧。如果你罕见地使用了金属罐晶体管，那么金属罐伸出的引脚应当指向下方和左侧。

注意，图中的绿色和黄色导线都多去除了一段绝缘层。如果你使用的是预切割连接线，那么需要把每根连接线的一头拉直，这样它们就能平齐地铺在面包板表面。

下面就是有趣的部分了。如图 2-94 所示，把手指按在绿色和黄色导线的裸露金属芯上，同时观察 LED。如果什么都没有发生，就略微沾湿手指，再试一次。你按得越用力，LED 就越明亮。晶体管放大了流过你的手指的小电流。

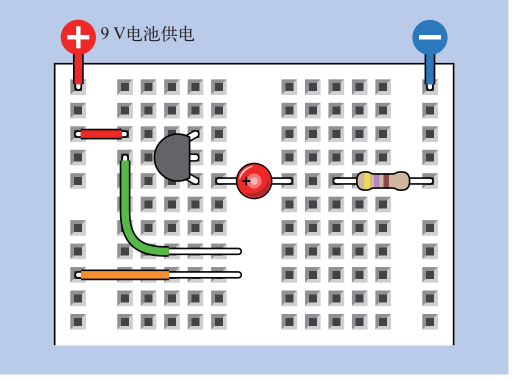


图 2-93　为第一次晶体管测试搭建的面包板电路

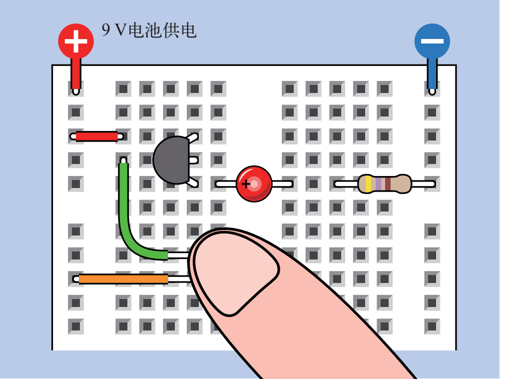


图 2-94　手指按上去，实验电路开始工作

注意：不要双手并用

如果电流只是流过你的手指，指尖开关演示实验就是安全的。你甚至都感觉不到电流，因为这只是一节小电池提供的 9 V 直流电。但是如果你用一只手的手指按住一条导线，另一只手的手指按住另一条导线，这样可不好。这样电流就能流过你的身体了。电流很小，这个电路并不会伤到你，但你一定不要养成让电流从一只手流到另一只手的习惯。而且，在你触摸导线时，不要让它刺破皮肤。这也意味着你不能将电压加在已经刺穿皮肤的任何首饰上。

手指实验的秘密

看看图 2-95，它画出了面包板内部的连接线，省略了未连入电路的连接线。注意，晶体管底部的引线通过面包板与 LED 连接，然后通过 470 Ω 的电阻器连接到负极总线上。因此，晶体管流出了足够多的电流，可以点亮 LED。

这个电流是从哪里来的呢？确实有一些电流通过你手指的皮肤流进了晶体管中央的引脚，但是这个电流太小，不够点亮 LED。

只剩下另外一种解释了。晶体管顶端有第三根引脚，与正极总线相连接，电流通过这根引脚进入晶体管。然后，这股电流以某种方式，由通过你的手指流入晶体管中间引脚的小电流所控制。

图 2-96 说明了这个原理。

顺带一句，这个现象与上一个实验中电容器的响应迥然不同。电容器只是通过了短暂的电流脉冲，而晶体管控制了稳定的电流。

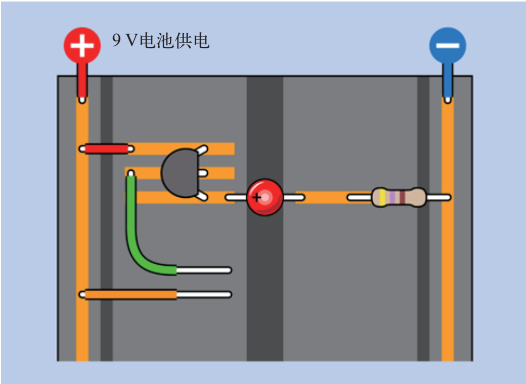


图 2-95　图 2-94 中面包板电路的透视视图

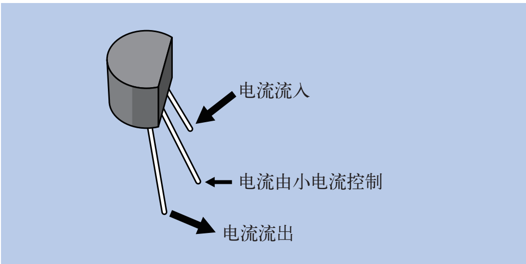


图 2-96　NPN 型晶体管的基本功能

基础知识：晶体管

本实验中，你使用的元件是双极型晶体管。它有两种类型，分别是 NPN 型和 PNP 型。你使用的 NPN 型晶体管包含三层硅，其中两个 N 层包含过剩的负电荷载流子。第三层硅——P 层夹在两个 N 层之间，包含过剩的正电荷载流子。我不会在原子层面上过细地讲解晶体管的工作原理，因为在本书中，我更感兴趣的是晶体管的功能，而非它工作原理的理论。你可以在任何一本技术教程或网

络资源中找到相关信息。

NPN 型双极型晶体管的三根引脚分别称为集电极、基极和射极，如图 2-97 所示。

❒ 当 NPN 型晶体管的基极电压比射极电压略高时，晶体管允许正电流从集电极流入，从射极流出。

❒ 以此方式，从晶体管基极流入的非常小的电流可以控制通过集电极流入的大电流。

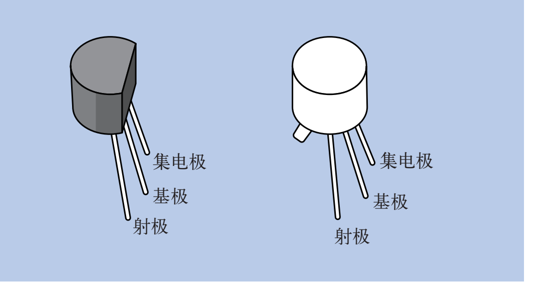


图 2-97 NPN 型双极型晶体管三根引脚的名称，左侧是塑料外壳晶体管，右侧是金属罐晶体管

PNP 型晶体管的功能与 NPN 型晶体管相反。当基极电压略低于射极时，它允许负电流从集电极流入，从射极流出。电路中，PNP 型晶体管有时更方便，但是用途并不广泛。在本书中，我不会使用它们。

图 2-98 展示了 NPN 型晶体管在电路图上的四种表示方法。它们的作用都相同。字母 C、B、E 提醒你，这些连接对应集电极、基极和射极。

图 2-99 展示了 PNP 型晶体管的四种电路图表示方法。它们的作用都相同。

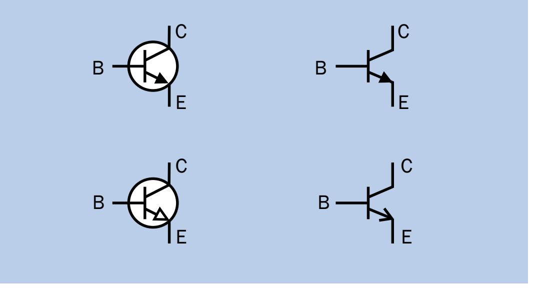


图 2-98 这些符号都可以用来表示 NPN 型晶体管

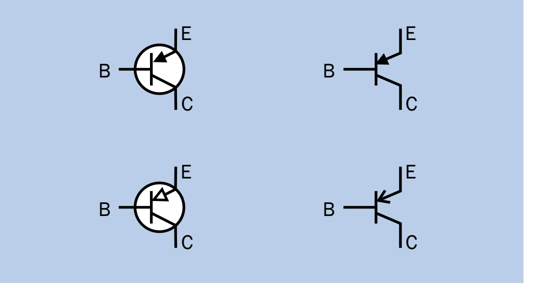


图 2-99 任何一个符号都可以用来表示 PNP 型晶体管

PNP 型和 NPN 型晶体管很容易混淆，但是有一种简单的方法可以辨别它们。NPN 符号里的箭头向外指，永远不向内。所以，可以把 NPN 想象为 never pointing in（永不向内指）的缩写。

增加电位器

为了更加深入了解晶体管的工作方式，我们需要一件比手指尖更可控制的元件。我认为电位器可以满足这一要求，但不是你以前用过的大型电位器。建议你使用微调电位器，如图 2-22 所示。

虽然电位器的形状和大小各不相同，但是它们都有三根引脚。这些引脚的功能和你以前用过的

大型电位器的三根引脚相同。中间的引脚总是与电位器内部的滑动片相连，而另两根引脚各自与电位器内部的电阻性轨道的两端相连接。以下是你必须遵循的基本规则：

把电位器插入面包板时，每根引脚必须与面包板上一排单独的孔相连接。

图 2-100 阐明了这条规则。在图的上方，我画出了三种电位器的俯视图，包括多转式电位器，虽然我没有推荐，但你有一天可能会用到。引脚从上方看不见，我画出了它们的位置，就如同可以通过元件看到它们一样。引脚的位置各不相同，但总是有三根，它们在垂直方向上的距离应为 1/10 英寸。

在图的下方，两个 Yes 的例子能正常工作，因为每根引脚都与面包板上不同的一排引脚相连接。两个 No 的例子不能工作，因为一对引脚会被面包板内部的一根导线短接。

了解了电位器的基本知识，你应该能够向晶体管电路中增加一个 500 kΩ 的电位器了，如图 2-101 所示。连接电源，用一把小螺丝刀沿顺时针方向一直旋转电位器，然后再沿逆时针方向旋转。注意，如果一开始 LED 是完全熄灭的，那么你要略微转动一下电位器上的螺丝，这样它才能亮起来。

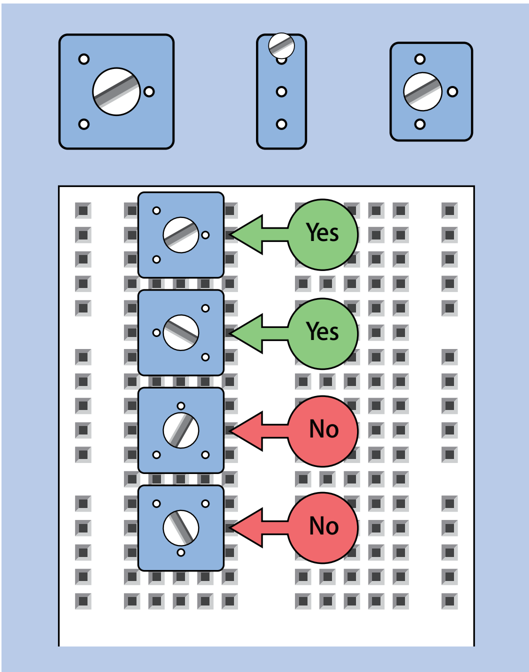


图 2-100　三种电位器以及它们引脚的正确方向

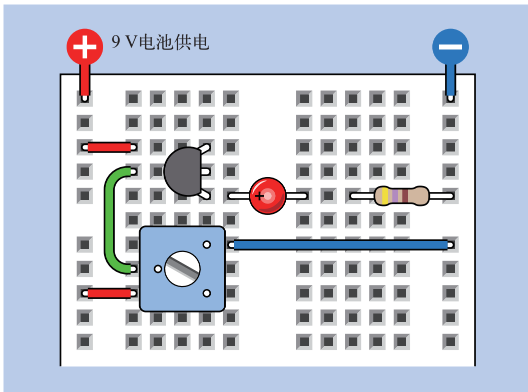


图 2-101　向原来的电路里增加电位器，这样你对晶体管的控制就比用手指控制更精确

看一看图 2-102 中的电路图，它的电路连接与面包板相同，但其布局更加简单易懂。

图 2-103 显示了各元件的值。

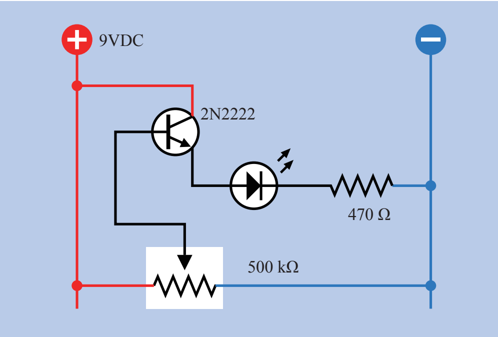


图 2-102　增加了电位器的面包板电路图

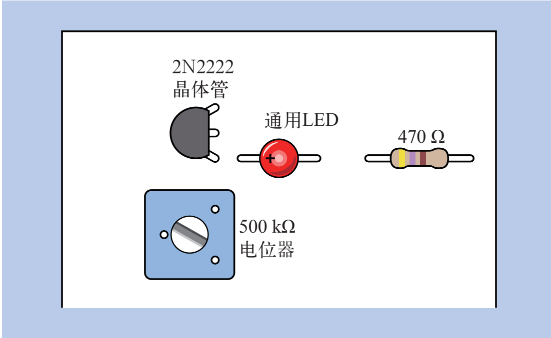


图 2-103　面包板电路元件的值

电位器接在正极总线和负极总线之间。从这个角度讲，我们称之为分压器。当滑动片位于轨道的一端时，它直接与电源正极形成连接。在轨道的另一端，它直接接地（负极）。在中间的位置，它划分电压。通常电位器的使用方法就是如此，用来提供全范围的各种电压值。

我刚刚说过，当你刚把电位器的滑动片从负极向正极移动时，LED 没有点亮。这仅仅是因为 LED 没有获得足够的电能吗？不完全是。双极型晶体管扣除了一部分电能，作为它提供服务的回报。基极电压高于射极电压（通常为约 0.7 V），它才会做出响应。这种模式下，晶体管是正向偏置的。

图 2-104 解释了这个一般概念。

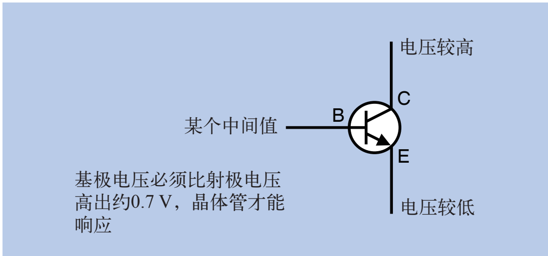


图 2-104　使用 NPN 型晶体管的经验法则

电压和电流

你已经知道，双极型晶体管基极的电压能控制晶体管的输出。这是否意味着晶体管放大了该电压呢？

你可以自己探究一下。拿出万用表，将它设置为测量电压，用一根测试引线将黑表笔与面包板上的负极总线固定，如图 2-105 所示。用红表笔触碰晶体管的射极引脚，记录电压，然后用红表笔触碰基极引脚。我保证射极上的电压要低于基极上的电压。

把电位器调整到不同的位置，再测量一次。无论你如何改变基极引脚上的电压，射极引脚上的电压总是要更低一些。

这是因为 470 Ω 电阻器没有在晶体管的射极和负极总线之间提供足够的电阻吗？是它把电压拉低的吗？

让我们一起找出答案。取下 LED 和 470 Ω 电阻器，在晶体管射极和负极之间连上一个 1 MΩ 的电阻器。大电阻并没有造成多少影响，射极上的电压仍将低于基极上的电压。

如果你有耐心测一测流入基极和流出射极的电流，你会发现它们存在巨大的差异。你必须将万用表设置为测量毫安电流，并将它连入电路中每个要测量的位置。记住，电流必须流过万用表才能测量到。

我要告诉你将会发现什么：这个晶体管放大了流入基极的电流，放大倍数大于 200。该因子称为晶体管的 β 值，我们由此得到了一个基本事实：

双极型晶体管放大电流，不放大电压。

在 *Make: More Electronics* 一书中，你会读到关于晶体管的更多内容。此处我只做简要阐述，因为本书是入门教材。

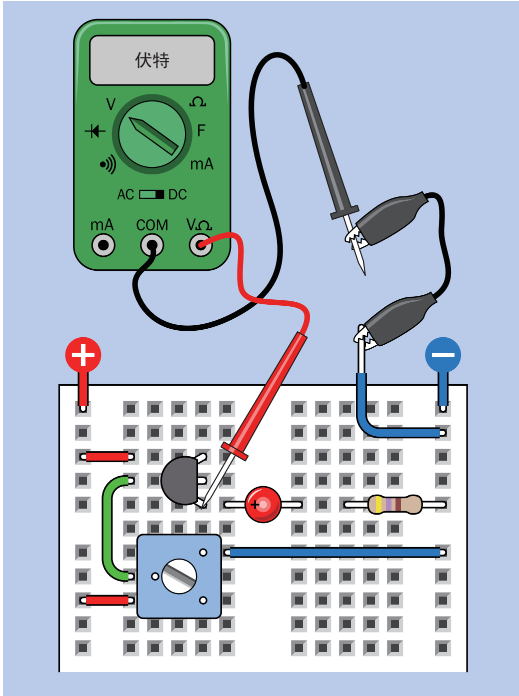


图 2-105　进行测试，找出晶体管是否放大了电压

下面我将总结双极型晶体管的相关知识，供你将来参考。

基础知识：NPN 型和 PNP 型晶体管的知识总结

晶体管是一种半导体器件，它处于导体和绝缘体之间。它的有效内阻会根据施加到基极上的电压而变化。

所有的双极型晶体管都有三根引脚：集电极、基极和射极，生产商的数据表上简写的 C、B 和 E，为你标明了这几根引脚。

- NPN 型晶体管由基极相对于射极的正向电压激励。
- PNP 型晶体管由基极相对于射极的负向电压激励。

无源状态下，两种晶体管都阻碍电流在集电极和射极之间流动，就像断开的单极单掷开关一样。（实际上晶体管允许很小的电流流过，称为泄漏电流。）

电路图中，晶体管的方向可能各不相同。射极可能在顶端，集电极在下方，或者相反。基极可能在左侧，也可能在右侧，这取决于电路图绘制人员怎么画方便。一定要注意观察晶体管符号的箭

头，看它朝向哪个方向，该晶体管是 NPN 还是 PNP 型晶体管。如果连接错误，你就会损坏晶体管。

晶体管有很多种尺寸和结构。很多晶体管的构造都让人难以判断，哪一根导线连接到了射极、集电极或基极。你可能需要查阅一下生产商的数据表。

如果你忘记了晶体管的引脚各是哪根，很多万用表都能帮助你分辨射极、集电极和基极。万用表上通常有四个孔，分别标着 E、B、C 和 E。当你把晶体管的射极引脚插入 E 孔，基极引脚插入 B 孔，集电极引脚插入 C 孔，万用表就会显示晶体管的 β 值。如果按照其他方向插入，万用表的读数就会不稳定或无示数，或读数为零，或远小于预计值（几乎总是小于 50，且通常小于 5）。

注意：脆弱的元件！

晶体管很容易损坏，儿且一旦损坏就不可恢复。

- ❒ 一定不要在晶体管的任意两引脚间直接连入电源，否则晶体管会被过大的电流烧毁。
- ❒ 一定要利用电阻器等其他元件限制晶体管集电极和射极之间的电流，按照同样的方法也可以保护 LED。
- ❒ 不要施加反向电压。NPN 晶体管的集电极电压一定要高于基极电压，而基极电压要高于射极电压。

背景知识：晶体管的起源

虽然有的历史学家把晶体管的起源追溯到二极管的发明（二极管允许电流向一个方向流动，而阻碍反向电流流通），但是第一个功能完备的实用晶体管是 1948 年由贝尔实验室的约翰 • 巴丁（John Bardeen）、威廉 • 肖克利（William Shockley）和沃尔特 • 布拉坦（Walter Brattain）开发出来的。

肖克利是团队的领导者，他具有远见卓识，预见了固态开关的潜在重要性。巴丁是理论家，而巴丁实际上是晶体管的发明者。在成功之前，这是一个非常高产的合作团队。晶体管发明出来后，肖克利就开始耍手腕，把晶体管的专利权完全归到自己名下。他把这个消息通知给团队成员时，很自然，大家都极不高兴。

有一张广为流传的宣传照还帮了倒忙。照片中，肖克利坐在中间的一台显微镜前，似乎是他完成了制造工作，而另两位成员站在他身后，暗示着他们的角色比较次要。这张照片的一个副本出现在了 *Electronics* 杂志的封面上（见图 2-106）。实际上，肖克利作为监督人，很少出现在发明晶体管的实验室里。

这个高产的合作团队很快解体了。布拉坦请求转到美国电话电报公司（AT&T）的实验室去。巴丁去了伊利诺伊大学研究理论物理。肖克利最终离开了贝尔实验室，创建了肖克利半导体公司，这家公司是硅谷的前身，但是他的雄心壮志超出了他所在时代的技术。他的公司从未制造出一件盈利的产品。

肖克利的八名员工最后背叛了他，他们离开了公司，建立了自己的企业——仙童半导体公司（Fairchild）。这家公司在晶体管和后来的集成电路芯片制造方面取得了巨大的成功。

基础知识：晶体管和继电器

NPN 型和 PNP 型晶体管的一个局限是：它们需要在电能供应下实现自身功能，而继电器则不同，它不需要任何电能输入就可以开关。

继电器还提供了更多的开关选项。不同继电器的状态可以为常开、常关，或者在任意位置闭锁。继电器内可能包含双掷开关，有两个开关可以选择；也可能包含双极开关，它能形成（或断开）两个完全独立的连接。单晶体管器件不能提供双掷或双极开关的功能，但是你也可以设计更复杂的电路来对该功能进行仿真。

图 2-107 比较了晶体管和继电器的特性。



图 2-106　威廉 • 肖克利（前）、约翰 • 巴丁（后）和沃尔特 • 布拉坦（右）于 1948 年合作发明了世界上第一个晶体管，于 1956 年被授予诺贝尔奖

	晶体管	继电器
长期使用的可靠性	优秀	有限
能否进行双极或双掷开关转换	否	能
能否开关大电流	能力有限	能
能否开关交流电	通常不能	能
能否由交流电触发	通常不能	可选择
是否适合小型化	非常适合	非常有限
能否高速开关	能	否
高电压/电流的价格优势	无	有
低电压/电流的价格优势	有	无
非导通时的电流泄漏	有	无

图 2-107　晶体管和继电器的特性比较

使用继电器还是晶体管将取决于每个具体的应用。

理论部分介绍完了。现在，我们能用一个有趣、有用，或是两者兼备的晶体管来做些什么呢？我们可以做实验 11 了！

实验 11：光和声

是时候让你自己开展第一个功能和目的齐备的项目了。最终你会做成一个非常简单的声音合成器。

需要的物品

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 电池和连接器 1 个
- ❒ 电阻器：470 Ω 2 个、1 kΩ 1 个、4.7 kΩ 4 个、100 kΩ 2 个、220 kΩ 2 个、470 kΩ 4 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 2 个、0.1 μF 2 个、0.33 μF 2 个、1 μF 1 个、3.3 μF 2 个、33 μF 1 个、100 μF 1 个、220 μF 1 个
- ❒ 晶体管：2N2222，6 个
- ❒ 通用 LED1 个
- ❒ 1 英寸（2 英寸更佳）8 Ω 扬声器 1 个

振荡

图 2-108 展示了我希望你在面包板上搭建的电路。元件之间的空隙并不大，因此用钳子安装元件要比用手指容易。仔细地数一数面包板上孔的个数，再检查两遍，确保所有元件都安装在了正确的位置。

图 2-109 展示了各元件的值。

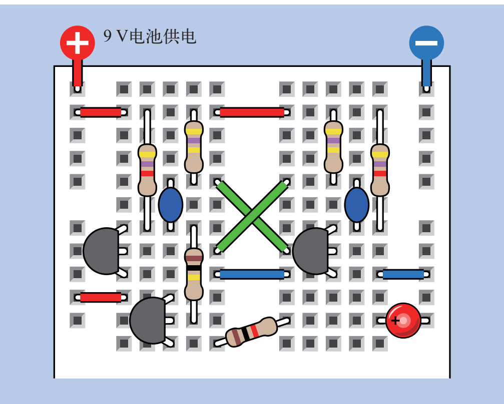


图 2-108　振荡器电路的面包板布局

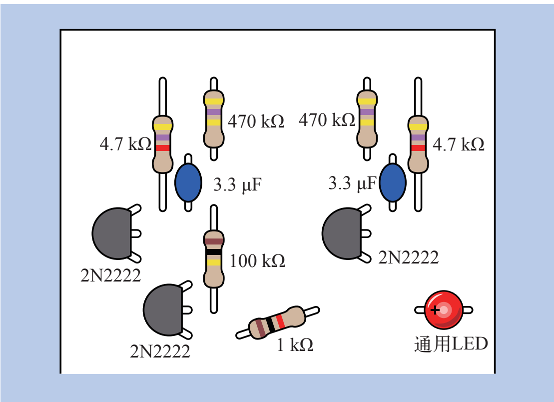


图 2-109　面包板电路各元件的值

连接电源，LED 会点亮大约一秒钟，然后再熄灭大约一秒钟。

这样就结束了吗？不，我们才刚刚开始。但是，首先你需要了解电路的工作原理。如果你难以想象面包板内部元件的连接方式，就看一看图 2-110。然后看看图 2-111，你会发现元件之间的连接都是相同的。我将利用电路图解释电路中发生了什么。

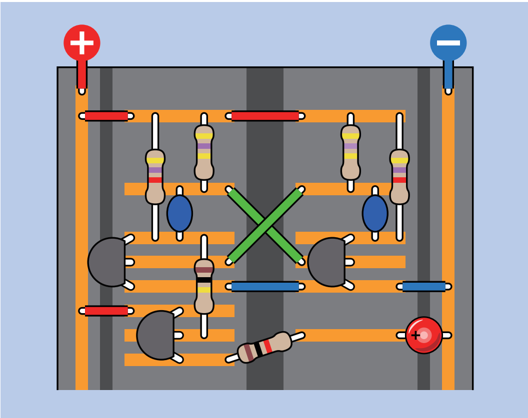


图 2-110　这张透视视图有助于说明元件之间的连接方式

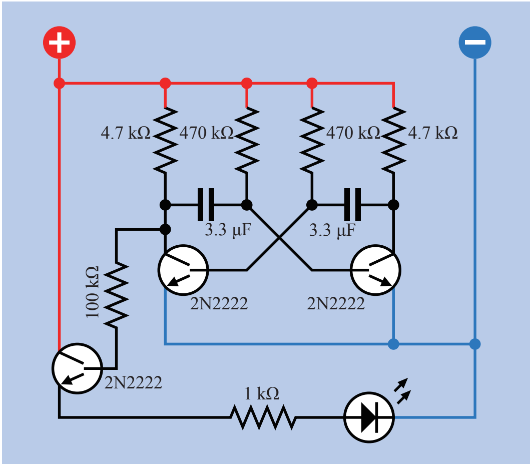


图 2-111　此电路图中的元件与面包板上的元件位置相似

你注意到的第一件事就是图 2-111 的对称性。这是否意味着电路的左右两部分都有相同的功能呢？是的，但它们不是同时运行的。实际上，一半电路点亮 LED，而另一半电路熄灭 LED。

要想细致理解这个电路比较困难，因为它的电压一直在波动，而且在任一给定时刻都有不止一件事件发生。我绘制了几张电路内部在工作间隙的快照，希望它们能将一切解释清楚。

所有图中，我都省略了第三个晶体管和 LED，因为它们对于形成振荡并没有作用。

图 2-112 展示了第一张快照。

我对导线进行了颜色编码。

- ❒ 黑色导线和元件的电压未知或不确定。
- ❒ 蓝色导线上的电压接近于零。

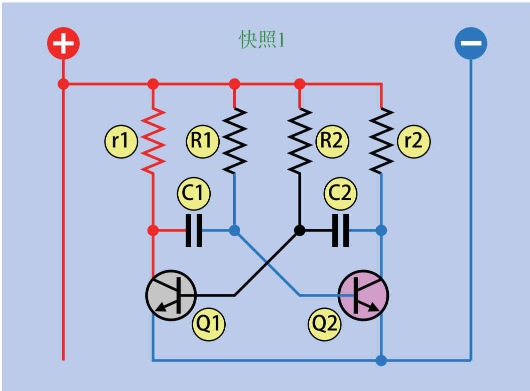


图 2-112　四张快照中的第一张，展示了 LED 闪烁电路中的电压

- ❒ 红色导线上的电压正在升高，接近电源电压。
- ❒ 白色导线上的电压短时间降到更低（低于接地端），其原因我即将进行解释。

关于晶体管，你要知道以下两点。

- ❒ 灰色的晶体管集电极至射极之间电流不导通。你可以认为它已经“关闭”。
- ❒ 粉色的晶体管正在导通。

晶体管分别标记为 Q1 和 Q2，这是标记晶体管的一般方式。老式金属罐晶体管上突出的小标签使它从上面看起来就像一个字母 Q，因而人们就养成了用字母 Q 标记晶体管的习惯。

为了区别电路的左右两侧，我把左侧的电阻器标记为 r1 和 R1，右侧的电阻器标记为 r2 和 R2。小写字母标记阻值较低的电阻器。

在我开始讲解之前，最后提醒一点。记住晶体管的以下基本特性。

- ❒ 当基极流入的电流“导通”晶体管时，晶体管的有效内阻就降到很低。因此，如果射极接地，其电压接近 0 V，那么集电极上的电压也将接近 0V，与集电极直接相连的任一元件电压也会降到 0 V。基极的电压也可以降到很低，但只要高于射极电压。你可以在快照 1 中观察到 Q2 发生的现象。
- ❒ 当晶体管“阻断”时，它的有效内阻升高到至少 5 kΩ。因此，任何连接到晶体管集电极的元件都不再通过晶体管接地，而获得了正电压。

分步讲解

我将从电路开始运行后的任一时刻开始讲起。说明了一连串的事件后，我将回到最初的问题：振荡是如何开始的。

快照 1 中，假设 Q1 刚刚阻断，Q2 刚刚导通。r1 的末端通过 Q1 接地，但是现在 Q1 已经阻断，其集电极上的电压已经开始升高，从而也升高了 C1 左侧的电压。Q1 基极上的电压也开始升高，但是速度不如集电极快，因为 R2 的阻值较大。同时，由于 Q2 已经导通，它正在从 r2 吸收电流，从而使电压下降。Q2 的基极也正在吸收电流，通过晶体管流向负极。

以上是初始设置。下一步呢？

快照 2 如图 2-113 所示，Q1 基极上的电压上升到了足够高的值，使晶体管开始导通。它正在通过 C1 和基极吸收电流，因此与之相连的导线现在为蓝色。C1 左侧电压的突然变化暂时引

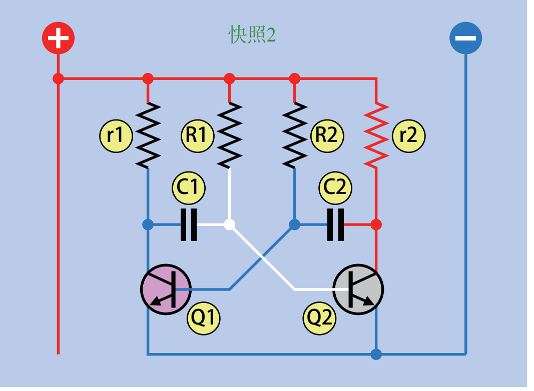


图 2-113　第二张快照

起了 C1 右侧电压的同等下降，这是实验 9 中叙述过的场效应（也可以描述为位移电流）的作用。实际上，C1 右侧的电压被拉低到了 0 V 以下，用白色导线表示。电压的瞬间下降引起了 Q2 基极上的负向偏置，从而立即阻断了 Q2。

在图 2-114 所示第三张快照中，Q1 仍然导通，Q2 仍然阻断。此图是快照 1 的镜像。C1 开始通过 R1 反方向充电，它正在逐渐抬升 Q2 基极的电压。

快照 4 如图 2-115 所示，Q2 已经开始导通，使 C2 的右侧接地。这一变化使得 C2 左侧的电压拉低到 0V 以下，并使 Q1 的基极接地从而阻断 Q1。此图是快照 2 的镜像。

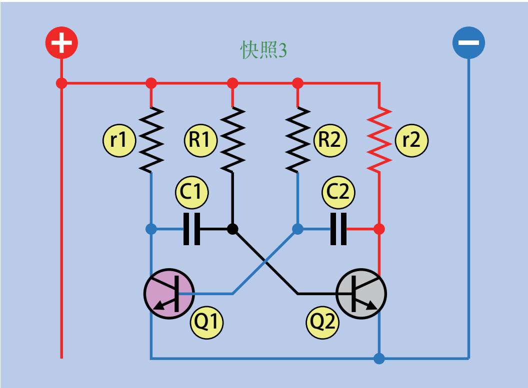


图 2-114　第三张快照

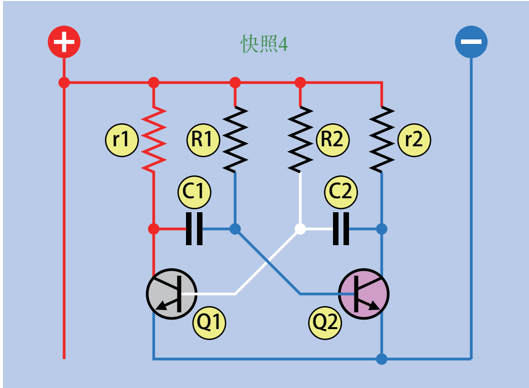


图 2-115　第四张快照；此后，上述事件重复出现

在第四张快照之后，情形回到快照 1 并重复。若另有晶体管和 LED 按照图 2-111 连入电路，LED 应当在快照 1 和快照 4 中点亮。

耦合电容器

如你所见，振荡器比较难以理解，而这个电路是很常见的。实际上，用 Google 图片搜索“振荡器”，你很容易找到这个电路，但是，仍然有很多人对此感到不解。

这个电路的关键在快照 2 和快照 4 中，电容器一侧的电压突降，在另一侧也产生了相同的电压突降——就是你在实验 9 中亲眼目睹的耦合作用。

但耦合是怎么开始的呢？

考虑到电路基本是对称的，当你第一次给电路通电时，为何不是两个晶体管都导通，或者两个晶体管都阻断呢？

在理想情况下，两个晶体管或电阻器能够完全相同，电路的初始化就会对称。但是事实上，电阻器和电容器总会存在一些制造误差，使得总有一个晶体管比另一个晶体管提前导通。这个现象一发生，电路就失去了平衡，从而出现我在前文描述过的振荡现象。

我需要解释的另一个问题是，如何决定在振荡器电路的哪个部位获取输出？在原电路中，请注意 r1 和 r2 的电阻远低于 R1 和 R2。这会使 C1 的左侧极板迅速充电，直至接近电源电压，C2 的右侧极板也一样。因此，我们可以从这两点中的任意一点测得幅度范围很大的电压。我选择了左侧的测量点，原因很简单：在这个点上向电路图添加元件更容易。

如果电路中的电流过大，电容器的充电速度将会减慢，进一步影响振荡器的时间设置和平衡。因此，我将输入信号通过一个 100 kΩ 的电阻器输入到另一个晶体管的基极。另一个晶体管的基极电流很小，但它会放大信号，所以你可以用晶体管做一些有用的事情。

为何如此复杂?

在本书的第 1 版中，我使用可编程单结型晶体管（Programmable Unijunction Transistor，PUT）设计了一个使 LED 闪烁的实验。PUT 的功能很容易理解，只需一个 PUT 就能得到实验结果。但是 PUT 已经不再广泛使用了，也有些读者抱怨说 PUT 不容易买到，或者太老气。

其实你仍然可以买到 PUT，不过它们几乎已经被淘汰。双极型晶体管的应用仍然很广泛，所以我听取了读者的反馈，放弃使用 PUT。我先研究了各种振荡器电路图，而最终确定使用此版电路图，主要原因是，它比其他电路图更为常见。而且，我认为但凡是振荡器电路，多少都有些难懂。

处理过的脉冲

你已经知道，两个晶体管可以发出断续的脉冲信号，而第三个晶体管能将信号放大，为 LED 提供电能。回想一下前面的实验，你从中学到了什么知识，可以应用到这个实验中呢？

本实验的电路波动速度十分缓慢，所以我们可以向电路中添加 *RC* 网络，使它变得更有趣。（如果你需要刷新一下关于 *RC* 网络的记忆，请参考本章 *RC* 网络一节。）

看一看图 2-116，新添加的 *RC* 网络在图的底部。

图 2-117 中，新增添的或改变位置的元件绘在右下角，用彩色标出，而未变化的元件画成灰色。

此时电路运行，LED 会缓慢地发出脉冲，而不是一亮一灭。你明白为什么吗？电容器通过第一个 470 Ω 电阻器充电，而通过第二个电阻器放电。这又有什么关系呢？让我们假设你正在考虑制作电子装饰品，对它的闪烁或脉冲方式的调整是一个非常重要的美学要素。在老式的苹果笔记本电脑上，商标会有脉冲式明暗交替，而没有闪烁。

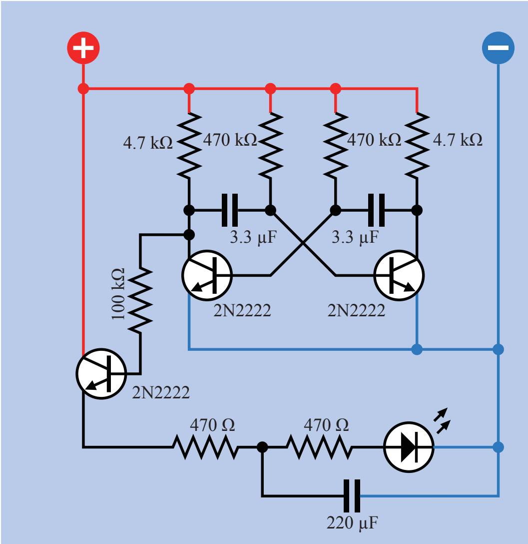


图 2-116　前一个电路图底部添加了一个电阻和一个 220 μF 的电容器，组成了 *RC* 网络

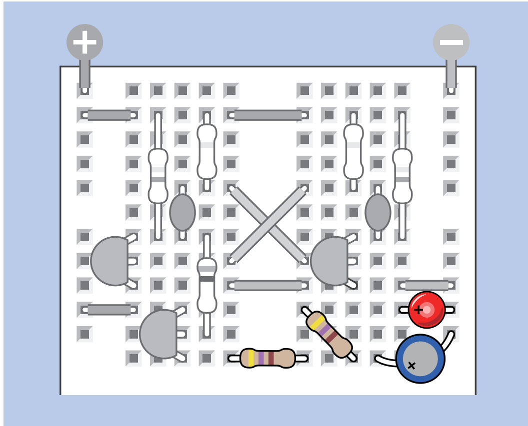


图 2-117　彩色元件是新增添的或位置改变的元件；新电容器是 220 μF 的电解质电容器

提高速度

还能怎样修改这个电路呢？你可以很容易地调整电路的速度。用两个 0.33 μF 的电容器替换两个 3.3 μF 的电容器。充电速度大约要快 10 倍，所以 LED 的闪烁速度也会提高 10 倍。是不是这样？

如果你进一步把电容器的容值减小到 0.01 μF，又会发生什么？振荡频率大于每秒钟 50 次，你就从可以看到的频域转变到了可以听到的频域。

如何把电路的输出从看得见变成听得见呢？很简单！拿掉 LED、470 Ω 电阻器和 220 μF 电容器，换上小扬声器、100 μF 耦合电容器和 1 kΩ 电阻器，如图 2-118 所示。电阻器把晶体管的射极接地，因为晶体管只有在射极的电压确定低于基极电压时才能工作。电容器阻碍了信号的直流分量，同时允许交流分量通过。电路图中，我只画出了有变化的元件。它们应该如何安装在面包板上呢？你一定能想出来。

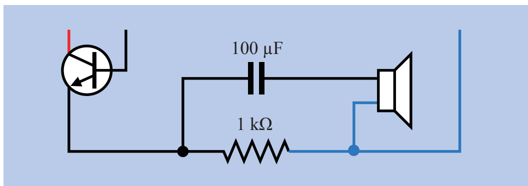


图 2-118　修改电路，产生音频

进一步修改

既然电路已经发出了声音，那么提高一下音调如何？只需替换振荡器电路中的小电阻器或小电容器即可。你可以移除 470 kΩ 的电阻器，用 220 kΩ 电阻器（或某个中间的阻值）替换。晶体管每秒开关信号的次数可达一百万次，因此振荡器频率的提高肯定不会超越晶体管的极限。每秒钟振荡一万次的信号听起来已经音调很高了。如果再提高到每秒两万次，就超出了几乎所有人耳的听觉范围。

那么改变一下音色怎么样？

在图 2-119 的上半部，我用一个 1 μF 的耦合电容器取代了原先的 100 μF 电容器，将它与扬声器串联。电容器的容值减小后，只能通过较高的频率（短脉冲），从而使声音失去一些低音共振。

如果你在扬声器两端并联一个电容器，如图 2-119 的下半部所示，会怎么样呢？会出现相反的情况，因为电容器仍然通过高频信号，却让它们绕过了扬声器。这个电容器的作用就是旁路电容器。

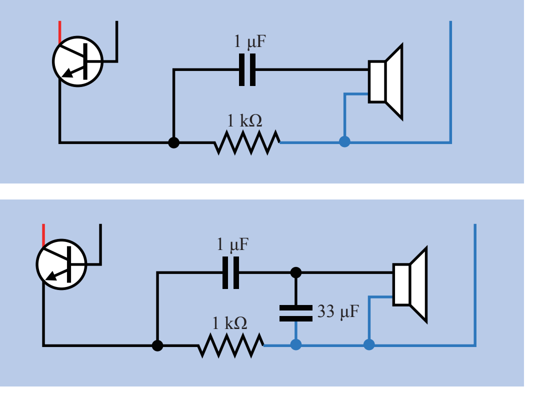


图 2-119　替换小容值的耦合电容器，低频音频信号受阻，因此你只能听到频率较高的声音。添加一个电容器，它会旁路扬声器，把高频信号引导至接地端，因此你只能听到频率较低的声音

电路有很多种简单的修改方法。如果感到更加斗志昂扬，你可以复制这个电路，用一部分电路去控制另一部分。

恢复图 2-109 中的原始元件值，电路就以原来的速度缓慢运行。然后，使用电路的输出给面包板上的复制电路提供电能，复制电路使用 0.01 μF 的电容器，用来产生音频。总电路如图 2-120 所示，电路中原有的元件画成了灰色，音频部分在最底端。

标记为 A 的红色导线改变了位置，以便电路的下半部分从上半部分的输出获取电能。标记为 B 的红色、蓝色导线是新添加的，用来填补面包板上总线之间的空缺。

如果你改变电路上半部分的容值或阻值来调快电路下半部分的振荡频率，会发生什么呢？

如果你把一个 220 μF 的电容器连接在各点（电路的上半部分和下半部分）和接地端之间，又会发生什么呢？这样做不会损坏任何元件，所以请你尽情试验。

另一种选择是回到图 2-116 产生的“经处理的脉冲”光信号，改变元件的物理连接方式。你可以把元件从面包板上取下，把它们做成一个小型可穿戴装置。

我将在实验 14 中向你展示如何制作可穿戴装置。当然，你必须要做一些焊接工作，焊接元件就是我希望你在实验 12（下一个实验）中学习的技能。

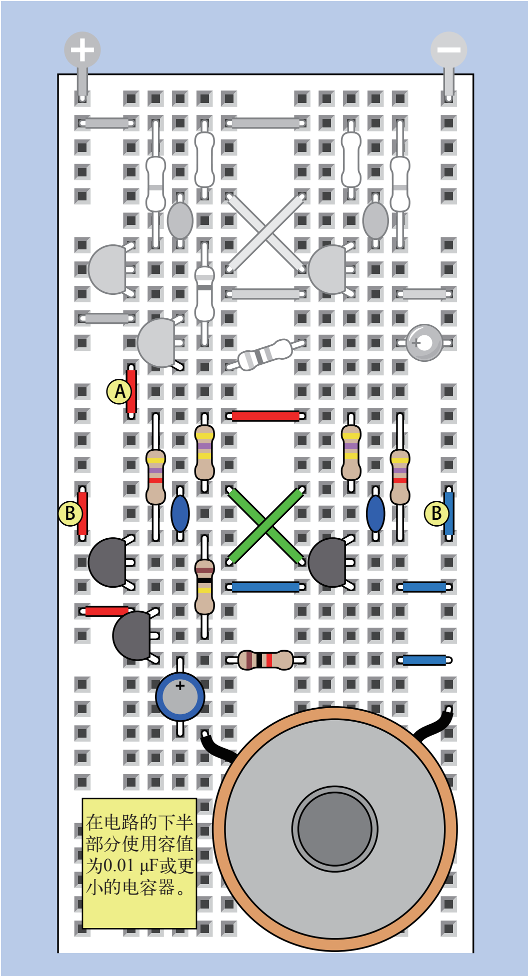


图 2-120　使用频率较低的复制电路提供波动的电压，驱动电路的音频部分

背景知识：安装扬声器

扬声器的膜片也叫纸盆，用来发出声音。但是，随着扬声器上下振荡，它的正反两面都发出声波。因为两列声波彼此反相，它们很容易互相抵消。

如果在扬声器周围加一个喇叭，将正面输出的声波聚焦，接收到的扬声器输出就能大幅度增加。对于一个 1 英寸大的小扬声器，你可以把一张大卡片弄弯，粘在它周围，如图 2-121 所示。

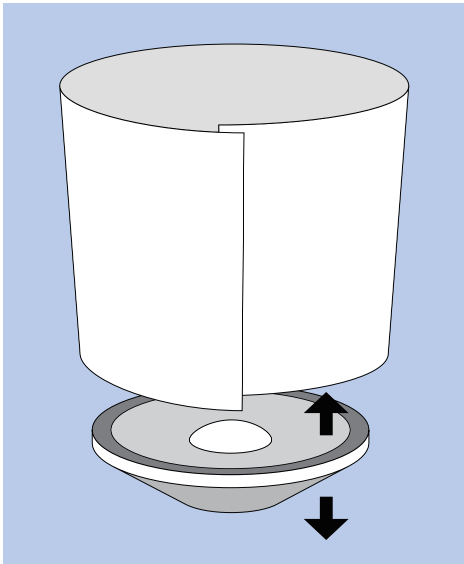


图 2-121　纸卷或硬纸管能够增加从扬声器听到的音量

更好的方法是，把扬声器安装在盒子里，盒子上钻有小孔，允许扬声器正面发出的声音向外辐射，而盒子封闭的背面吸收了扬声器反面发出的声波。

3 第 3 章 学点更重要的东西

在本章，你会将目前所学的知识应用到几个完整项目上。我将向你展示如何把实验 11 中的“脉冲发光”电路做成可穿戴器件，也将带你了解防入侵报警器的初步研制过程。展望未来，在第 4 章，你将跨入集成电路芯片的世界。

除去前面介绍过的实验用具，本章描述的工具、设备、元件和配件对于实验 12 到实验 15 都非常有用。

购物清单

和前面一样，在购买工具和设备时，请参考第 6 章购买工具和设备一节准备购物单。如果想买元件和配件套装，请参考套装一节。如果你喜欢从在线商店自己购买元件和配件，请参考元件一节。

必要工具：电源

对于本书的所有实验，你都可以继续使用 9 V 电池，但是我现在把交流适配器划分为最重要的电源，因为它使用起来更加方便。而且，我认为你会逐渐开始搭建更耗电的电路，使用交流适配器应该比买电池更便宜。

为了转换家用电源插座中的交流电流，你有三种方案可选。

如图 3-1 所示，通用适配器是最灵活的选择，它能提供可切换的电压值，一般包括 3 V、4.5 V 或 5 V、6 V、9 V 和 12 V。用通用适配器充电的是小器件，例如录音机、手机和媒体播放器，等等。它们不一定能输出完全平稳或精确的直流电压，但是你应该能用几个电容器来平稳电压。接触使用适配器的实验时，我会说明这一点。

或者，你也可以买一个单电压交流适配器来提供 9 V 的直流电压，如图 3-2 所示。使用工作电压为 5 V 的数字逻辑芯片时，你可以用一个便宜的小元件——稳压器来转换 9 V 电压。（稳压器也能在 9 V 的电池电压下工作。）



图 3-1　这件交流适配器插在墙上，允许你通过拨动小开关选择各种直流电压值



图 3-2　固定提供 9V 直流输出的交流适配器

第三个方案是花更多的钱，买一台合适的台式电源，它能提供 0 V~15 V 以及−15 V~0 V 的可变直流输出电压，还可以固定提供 5 V 的输出电压。在台式电源的顶端还应该安装几块面包板，这样就非常方便了。如果在电子学领域中继续探索，台式电源无疑将非常实用，但是现在你可能还难以确定。

如果你决定购买通用适配器，请参考第 6 章**其他元件**一节，找到对应本书第 3 章的那部分指导意见。

无论购买哪种适配器，它都必须具有以下属性。

- 输出必须是直流而非交流。几乎所有的交流适配器都输出直流电压，但是也有例外。
- 额定输出电流必须至少为 500 mA（也可能写作 0.5 A）。
- 直流功率输出线的插头种类并不重要，插头是要剪掉的。
- 同理，如果通用适配器带有各种输出插头适配器，不用担心它们的种类，你不会用到它们。
- 如果你使用的是非常便宜的交流适配器，当电流达到额定限度时，适配器可能变得不可靠。在美国，购买适配器时请认定保险商实验室（Underwriters Laboratories）认证的 UL 标志。

必要工具：低功率烙铁

面包板是快速搭建电路、理解电路工作原理的必备工具。但是要想制作永久的电连接，保留电路，**烙铁**必不可少。烙铁是这样工作的：熔化一根细细的合金线（称为**焊料**），在需要连接的铜线或元件引脚周围形成焊滴，焊滴冷却后，连接点会十分稳固。

烙铁并非一定要买。你可以用面包板完成本书的所有实验。但是，制作能够长期留存的物品有特殊的乐趣，焊接也是一项有用的技能。因此，我把烙铁列为了“必要工具”。

我个人比较喜欢用低功率烙铁焊接易受高温损害的小部件，用通用烙铁完成更重的焊接任务（下文即有描述）。有些人喜欢用一把自动调温控制的烙铁进行所有焊接工作，但是我认为，太小的烙铁不能满足某些焊接的热量要求，中等大小又不容易进行精细的焊接。而且，自动调温控制部件也非常昂贵。



图 3-3　用于精确电子焊接工作的低功率烙铁

低功率烙铁的额定功率应为 15 W，而且它的个头越小，使用起来就越容易。烙铁头应该是细长的，尖端逐渐变细，变成一个小圆点，就像刚削过的铅笔。电镀的烙铁头更好，但是生产商不一定会说明烙铁头经过了电镀。图 3-3 展示了一把用旧了的 15 W 烙铁。烙铁头变色是高温的正常结果，不会影响功能。

必要工具：通用烙铁

15 W 烙铁提供的热量有限，难以焊接较粗的导线，尤其难以焊接重型开关这样的元件。它的接线端子要控制很大的电流，烙铁的热量不足。开关的端子能够非常迅速地吸收热量，低功率烙铁无法把接线端子加热到足够高的温度，无法熔化焊料。尝试把导线焊接到大型电位器的焊接片上时，也会遇到类似的情况。

遇到这些情况，就要用到额定功率 30 W~40 W 的烙铁了。虽然本书大部分实验都不需要这种烙铁，但是我推荐你在第一次焊接时使用它，因为它发出的热量更高，更容易形成焊接点。30 W 的烙铁通常比 15 W 烙铁便宜，额外开支也更少一点。我认为楔形的烙铁头热传导效果更好，而且你不会用它进行精细的工作，不需要尖尖的烙铁头。

烙铁常用术语

有些烙铁内部装有拆焊泵，能给焊接点拆焊。这个泵是一个活塞，你用手指拉住它，从烙铁头吸入一点空气。我认为它的效果并不是很好，而且我也只在 30 W 烙铁上见过拆焊泵，但 30 W 的功率对于很多应用来说又太大了。

烙铁的产品说明书中可能包含“钎焊”这一术语。你可以忽略这个不准确的用法，因为一般来说，烙铁是不可以进行钎焊的。

有几种烙铁带有辅助设备（Helping Hand），可以抓住小部件，方便使用烙铁焊接。这个组合值得考虑购买，这比单独购买设备要便宜。下文描述了辅助设备。

如果烙铁和焊料一起出售，焊料必须为包含松香芯的电焊料方可使用。

很多烙铁都被称为铅笔型烙铁。这个术语的信息量不大，因为它既可以指 15 W 的烙铁，也可以指 30 W 的烙铁。

但是，铅笔型烙铁的外观与手枪型烙铁有所不同，例如威乐公司制造的 Therma–Boost 烙铁，如图 3-4 所示。有些人更喜欢手枪型烙铁的人机工程学设计，而且 Therma–Boost 具有很好的快速启动特点，在一分钟之内就能达到工作温度，这使它成为了急性子的理想工具。不过，手枪型烙铁的额定功率都不小于 30 W，而且一般比普通的铅笔型烙铁贵。

必要工具：辅助设备

辅助设备也称第三只手，有两个弹簧夹，可以精确地固定住元件或导线，方便你用焊料焊接它们。有些辅助设备上还装有放大镜、可放置烙铁的金属螺线架，以及一小块海绵，可以用来清洁弄脏的烙铁头。这些东西都很好，但并不是必需的，如图 3-5 所示。



图 3-4　在焊接较粗的导线和较大的元件时，威乐公司生产的 30 W Therma–Boost 烙铁很有用



图 3-5　带有配件的辅助设备

必要工具：放大镜

不管你的视力有多好，检查多孔板上的焊接点时，一柄好用的手持小放大镜十分重要。图 3-6 中的三透镜套专为贴近人眼使用而设计。它比辅助设备上的大放大镜好用得多，我认为非常实用。图 3-7 中的折叠透镜可立在工作台上，不必用手操作。两种放大镜都可以在兴趣商店或 eBay、亚马逊等在线商店中买到。如果小心使用，塑料放大镜也可以接受。



图 3-6　手持放大镜对检查焊接点非常重要

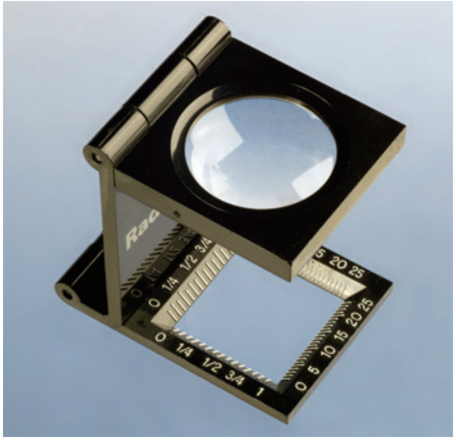


图 3-7　这种折叠放大镜可以立在工作台上

可选工具：带夹子的万用表表笔

在前面的实验中，我建议你用测试引线上的弹簧夹夹住万用表的一根表笔，用引线另一端的弹簧夹夹住导线或元件。

一种更讲究的方法是买一对“小爪钩”表笔，一端有带弹簧的小钩子。图 3-8 所示的型号为 Pomona 6244-48-0 的表笔就可以。但是，这种表笔相对昂贵。你可能更喜欢末端是小弹簧夹的表笔，如图 3-9 所示。它们一般最便宜。或者，你也可以继续按照我前面讲的方法使用测试引线。

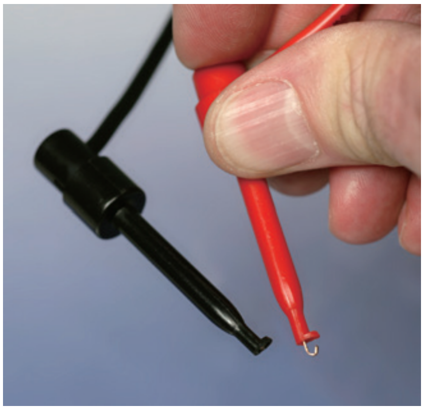


图 3-8　表笔上的这些“小爪钩”能抓住导线或元件的引脚

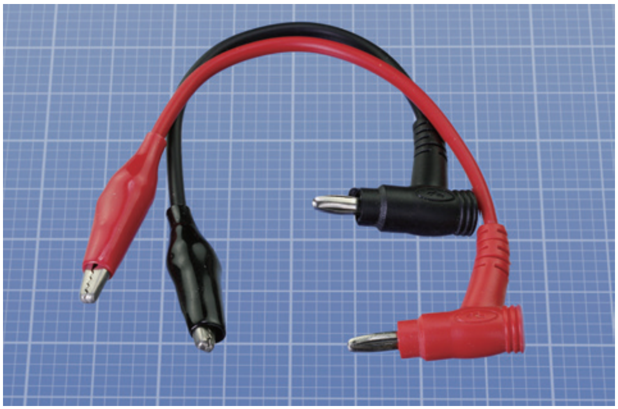


图 3-9　一端是小型弹簧夹的表笔

可选工具：热风枪

把两根导线焊到一起，通常需要使它们绝缘。你可以使用电工胶带（有时也叫绝缘胶带），但是它不容易粘好。更好的选择是热收缩管，它能在裸露的金属连接点上形成安全、永久的保护层。为了使热收缩管收缩，你要用到热风枪。它就像功率很大的吹风机，如图 3-10 所示。热风枪可以在任何一家硬件商店里买到，我建议你购买一把最便宜的。

对于精确的工作，你可能更喜欢用小型热风枪，如图 3-11 所示。



图 3-10　用热风枪加热热收缩管时，热收缩管能在裸露的导线周围形成收紧的绝缘保护层



图 3-11　小型热风枪比全尺寸的热风枪更易操作

可选工具：拆焊设备

在你尝试移除错误的焊接点时，拆焊泵能够吸收熔化的焊料，如图 3-12 所示。我的一些读者坚持说拆焊泵是必要工具，而不是可选工具，但这是个习惯问题。如果出现了焊接错误，我更喜欢把线剪断，再焊一遍。

拆焊线也叫吸焊编织线，用来吸收与吸锡泵相连的焊滴，如图 3-13 所示。



图 3-12　为了去除焊接点，你可以把熔化的焊料吸收进这个可挤压的橡胶球里



图 3-13　去除液态焊滴的另一种方法是用铜编织线吸收

可选工具：烙铁架

灼热的烙铁不用的时候要放在烙铁架上，就如同菜刀要放在刀架上一样，如图 3-14 所示。如果不想花钱买烙铁架，你可以即兴制作一个代替品，例如把钢制电缆或罐头钉在一块木头上做成支架。你也可以把烙铁放在工作台边缘，向自己保证，一定非常非常小心，不要移动它（我已经经历过这种事情）。烙铁掉到地上时会熔化化纤地毯或塑料地砖。知道了这个，你可能会在看见烙铁掉落时试图接住它。如果抓住了灼热的一端，你会烫得松开手，所以你还是让它直接掉到地上吧，省去中间把自己烫坏的这一步。

或许烙铁架也应该列为必要工具。



图 3-14 一个安全而简单的烙铁架，用于安放灼热的烙铁。黄色的海绵可以用水沾湿，清洁烙铁头

可选工具：小手锯

总有一天，你会想要把制成的电子产品安装在美观的外壳里。为此，你可能需要用工具把薄塑料修剪成形。例如，你可能想剪出一个方孔，这样就可以在其中安装一个方形的电源开关了。

电动工具的威力对于这种精细的工作就太大了。小手锯是修剪物品至合适尺寸的理想工具。X-Acto 生产各种小手锯锯条，如图 3-15 所示。



图 3-15 小手锯常用于在塑料盒上切割小孔以安装元件

可选工具：去毛刺工具

去毛刺工具能够迅速将粗糙的塑料或铝制品边缘打磨光滑或做出斜面，还能略微扩大孔径。它可能是必需品，因为有些元件按照公制尺寸生产，不能与美制钻头钻出的孔相贴合，如图 3-16 所示。

可选工具：游标卡尺

游标卡尺看起来像一件奢侈品，但它在测量圆形物体（例如开关或电位器上的螺纹）的外直径或孔的内直径（你可能想把开关或电位器安装在孔内）时非常有用，如图 3-17 所示。选择使用纽扣

电池供电、带有数字输出的游标卡尺，读数可以在公制单位和英寸之间转换。



图 3-16　去毛刺工具

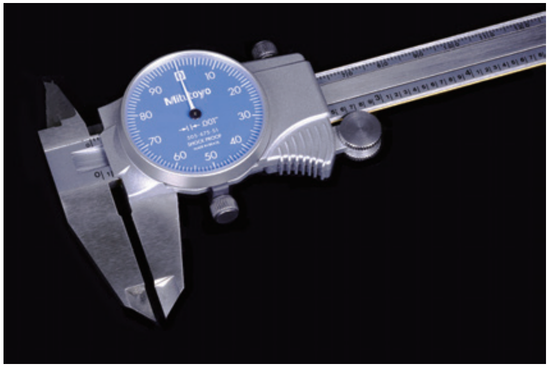


图 3-17　游标卡尺可以测量物体的内外直径

耗材

虽然我列举的很多工具都是可选的，但是下面东西必不可少。除非你非常肯定自己永远不想制造一件可以长期留存的装置。制造长期留存的装置所用工具和材料的价格和有线电视包月差不多，我认为这项投资很值得。

必要工具：焊料

你要熔化焊料，在可以构成产品的底座（我们希望是）上连接元件。焊接非常小的元件时，焊料最好非常细，直径为 0.02~0.04 英寸。图 3-18 展示了粗细各异的焊料。对于本书的实验而言，一小段焊料（半盎司重，或者大约 3 英尺长，不到 1 米）就足够了。

不要购买管道工人专用的焊料，也不要购买珠宝工艺使用的焊料。在生产商对于焊料用途的描述中应当出现“电子”一词。

关于含铅焊料的使用存在一些争论。一位有经验的机械师向我保证，老式焊料能形成更稳固的连接点，焊接更容易，焊接温度更低，如果用

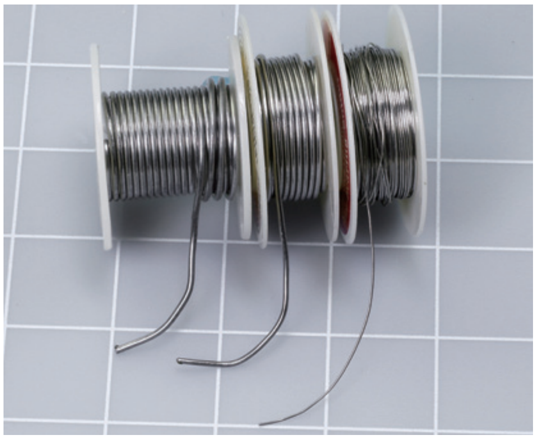


图 3-18　粗细不同的几卷焊料

量较少，健康风险也很小。他指出，无铅焊料也有自己的缺点，因为它包含更多松香，熔化后产生的烟雾更多。这个问题在网上引起了广泛的讨论，搜索“含铅焊锡安全性（lead tin solder safety）”就可以看到。

我个人缺少专业知识，无法作出判断。但是我知道，如果生活在欧盟国家，为了环保，你是不允许使用含铅焊料的。

你需要的一定是适合应用于电子元件的松香芯焊料。要不要选含铅的，你自己决定。

可选工具：热收缩管

热收缩管与热风枪配合使用，上文已经介绍过。最好根据自己的选择，准备多种尺寸、任意颜色的热收缩管，如图 3-19 所示。滑动热收缩管，把它套到焊接点上，用热风枪加热。热收缩管在焊接点周围收缩，使焊接点绝缘。收缩后的直径一般为原直径的一半，但有的热收缩管有更高的收缩比。不同的材料具有不同的绝缘、耐磨特等性能。在 McMaster-Carr（http://bit.ly/mm-hst）的网站上能找到很多种热收缩管及其各种性能的详细信息。对于我们的目的而言，最便宜的热收缩管就足够了，只要它的额定电压是 240 V（或更高）即可。一盒（包）五六种直径的管子能够满足你的要求。你更有可能使用细一些的热收缩管。



图 3-19　各种热收缩管

必要工具：铜质弹簧夹

在你焊接易损坏的元件时，铜质弹簧夹能够吸收热量。不要被镀铜的钢夹所欺骗，你一定要买铜质弹簧夹，如图 3-20 所示。尽量少买几个，因为你可以无限期地使用它们。两个夹子就够了。



图 3-20　这些小铜夹能在你焊接元件时吸收热量，保护元件

可选工具：多孔板

在你准备好把电路从面包板转移到最终的固定位置后，你可以把电路焊接到一块多孔板上，这块板通常也叫“原型板”。

最容易使用的多孔板背面镀有铜线，它与面包板内部的导线布局完全相同。这种板子能保持相同的元件布局，帮助你在转移电路时把错误减到最少，如图 3-21 所示。最初，你只需买一块多孔板。

使用面包板元件布局的缺点是不太节约空间。为了把电路的尺寸压缩到最小，你可以在普通的多孔板上尝试点对点接线——我将在实验 14 中向你展示具体做法。你可能只需用到一小块多孔板，但是你可以买一块大的，想用多少就切下来多少，如图 3-22 所示。

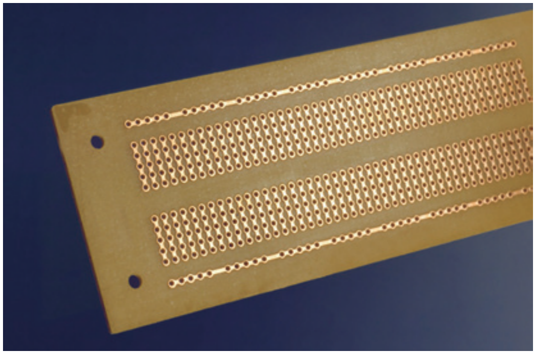


图 3-21　这块多孔板背面的铜线与面包板内部的导线布局完全相同

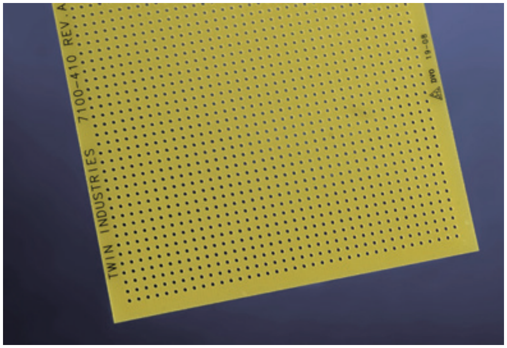


图 3-22　普通多孔板（无铜线），用于点对点接线

另一种方法是使用铜线布局不同的多孔板。例如，断流板板面上的铜线互相平行，如果想破坏一个连接，你可以用刀子把铜线切断。焊过很多东西的人似乎各自都有喜欢的电路板布局，但是我认为，在开始探索使用哪种板子之前，你需要先熟悉一下焊接过程。

可选工具：三合板

在使用烙铁时，滚烫的焊滴容易滴到桌面或工作台上。焊滴几乎一瞬间就凝固了，难以清除，还会在桌面上留下坑。你可以考虑使用 2 英尺见方、0.5 英寸厚的三合板提供保护，用后即可丢弃。你可以在任何一家大型五金店买到切割好的三合板。

可选工具：机械螺丝

为了在面板背面安装元件，你需要用到小机械螺丝（俗称螺钉）。在打好埋头孔的前提下，如果螺丝是平头的，安装时能够与面板平齐，看起来会很好。我建议你使用不锈钢机械螺丝，尺寸为 4 号，长度在 3/8~1/2 英寸，配合有尼龙衬垫的 4 号锁紧螺母使用，这样不会松动。

必要工具：项目盒

项目盒就是一个带有活动盖子的小盒子（通常用塑料制成）。它的名称表明，它用于盛放你的电路项目作品。开关、电位器和 LED 要安装在盖子上钻出的孔内，电路焊接固定在盒中盛放的多孔板上。你也可以用项目盒存放小扬声器。

对于实验 15 中的防入侵报警器项目，你可以使用一个长约 6 英寸、宽约 3 英寸、高约 2 英寸的项目盒。

必要工具：电源连接器

在你完成一个项目，把它收入盒子之后，就需要用便捷的方式为它提供电能。你可以购买图 3-23 所示的低压直流插头插座。它们的正确名称是“鼓式插头”和“鼓式插座”，但是有时也叫作“6 V 直流插头”和“6 V 直流插座”。它们有多种尺寸，但这并不重要，只要连接器的尺寸相符即可。



图 3-23　右侧的插座可以安装在项目盒上，从左侧的插头获取电能，插头可以与交流适配器的导线相连接

可选工具：连接头

在把电路焊接到多孔板上以后，你就需要将电路与单独的开关或按钮连接起来。如果你不需要修改电路板上的错误，选用不可拔除的连接件更好一些。

小连接器有时叫作单列插座和连接头，但是有时也叫作电路板安装插座和针接式连接头，一条连接器上有 36 个小连接头，或者更多，你需要多少都可以掰下来。

图 3-24 展示了一条连接器和掰成小块的连接头。一定要确保连接头末端的间距为 0.1 英寸，能够与多孔板匹配。（有些连接器采用公制间距。）

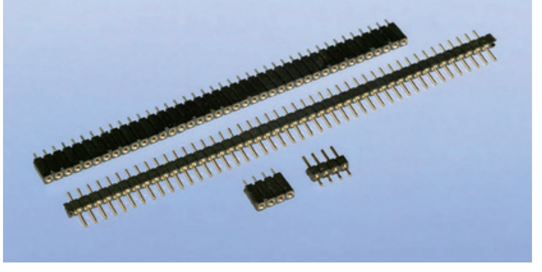


图 3-24　小型连接器通常称为“连接头”

元件

我必须再次提醒你，可以买元件套装，请参考第 6 章套装一节。如果你喜欢从在线商店自己购买元件和配件，请参考第 6 章元件一节。除了我在第 2 章开头描述过的元件（参考第 2 章的元件一

节），你还需要购买以下元件。

二极管

二极管沿一个方向导通电流，而阻碍相反方向的电流。二极管电压较低的一端称为**阴极**，用一条线做出了标记，如图 3-25 所示。图中右侧的二极管型号为 1N4001，它的额定电流略大于左侧的 1N4148 二极管。它们很便宜，将来的用处也可能很大，所以每样买 10 个吧。生产商并不重要。

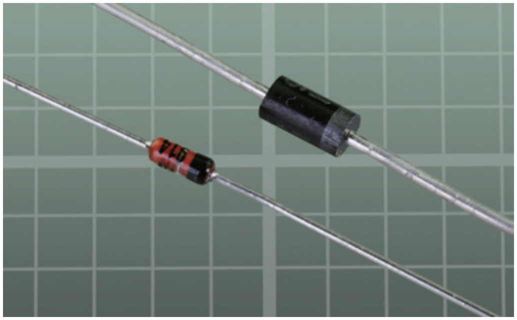


图 3-25　两个二极管，阴极作出了标记

实验 12：焊接两根导线

现在你已经准备好使用我刚才描述的工具和元件了，第一个要用的就是烙铁。

你的焊接冒险将从焊接两根导线开始，虽然开头平淡无奇，但是很快你就能在多孔板上焊出完整的电路。那么，我们开始吧！

需要的物品

- ❒ 连接线、剪线钳、剥线钳、30 W（或 40 W）烙铁、15 W 烙铁
- ❒ 辅助工具（用于抓握工件）
- ❒ 细焊丝
- ❒ 较粗的焊丝（可选）
- ❒ 各种热收缩管（可选）
- ❒ 热风枪（可选）
- ❒ 较重的硬纸板或三合板，保护工作台免受焊滴损坏（可选）

注意：烙铁确实会变热！

请采取以下基本预防措施：

使用合适的支架（例如辅助工具中包含的支架）来放置烙铁。不要把烙铁放在工作台上。

如果你家里有小孩或宠物，他们可能会抢夺烙铁，把烙铁当成玩具，或者拿导线往烙铁尖上靠。他们会伤害到自己（或你）。

注意，千万不要把灼热的烙铁头靠在烙铁的电源线上。烙铁几秒钟就会使塑料熔化，引起严重的短路。

如果烙铁不慎掉落，不要愣充英雄去接住它。

大多数烙铁都没有警示灯，不能告诉你它们已经插入了插座。一般情况下，要假设烙铁是热的，即使它已经拔出了插座。烙铁头上的热量依然可能将你烫伤，热量存留的时间也比你想象得长。

第一个焊接点

我们将从通用烙铁——额定功率 30 W 或 40 W 的烙铁开始。插上插座，把烙铁安全地放在烙铁架上，然后在接下来的五分钟内找点别的事情做。如果不给烙铁足够的时间完全加热，你就焊不出好的焊接点，因为焊料可能无法完全熔化。

剥下两段 22 线规连接线一端的绝缘层，用辅助工具夹住它们，使它们互相交叉并接触，如图 3-26 所示。

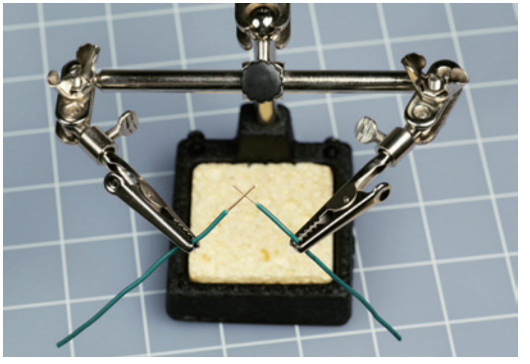


图 3-26　准备好第一次焊接冒险

为了确定烙铁已经加热好，用一根细细的焊料触碰烙铁头，焊料应该立即熔化。如果它熔化得很慢，说明烙铁还不够热。

如果烙铁头比较脏，那么你应该清理一下。通常程序是润湿烙铁架上的海绵，用烙铁头在海绵上摩擦。我个人不喜欢这样做，因为我认为把烙铁头润湿会引起热胀冷缩，从而可能使烙铁头的镀层产生小裂缝。我用一张压皱的纸快速擦拭灼热的烙铁头，速度要足够快，以避免纸烧焦，然后沾一点点焊料，再次擦拭烙铁头，直到它均匀发亮为止。

清理干净烙铁头之后，遵循图 3-27、图 3-28、图 3-29、图 3-30 和图 3-31 中的步骤进行。

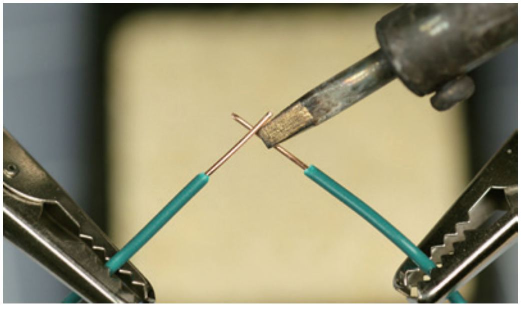


图 3-27　第 1 步

第 1 步：用灼热的烙铁头稳定接触导线的交叉点三秒钟，给它加热（如图 3-27 所示）。

第 2 步：保持烙铁位置不变，用一小根焊料靠近导线的交叉点，也与烙铁头接触（如图 3-28 所示）。这样一来，两根导线、焊料和烙铁头应该交于一点。

第 3 步：起初，焊料可能熔化得很慢，请耐心等候（如图 3-29 所示）。

第 4 步：现在你会发现焊料形成了一个好看的圆形液滴（如图 3-30 所示）。

第 5 步：拿开烙铁和焊料，向焊接点吹气使之冷却（如图 3-31 所示）。10 秒之内，它就凉下来，

可以用手指触摸了。焊好的焊接点应该有光泽、外表均匀、形状为圆形。

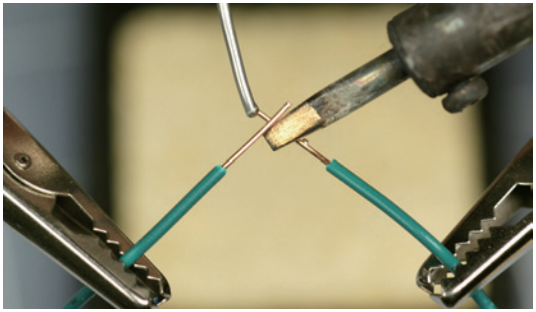


图 3-28　第 2 步

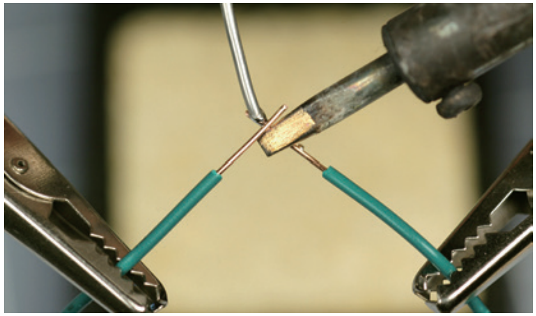


图 3-29　第 3 步

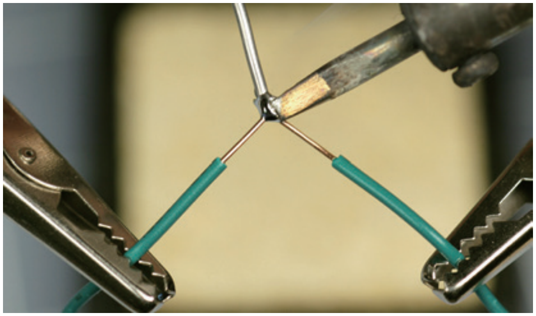


图 3-30　第 4 步

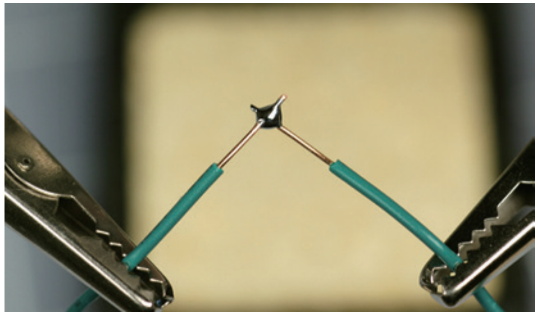


图 3-31　第 5 步

焊接点冷却之后，松开夹子取下导线，试着把它们拉开。用力拉！如果你用尽最大的力气都拉不开，那说明导线形成了电学连接，而且能够保持。如果焊接点焊得不好，你就能比较容易地把导线拉开，这可能是因为加热不充分或焊料熔化得不够多。图 3-32 画出了验证方法的大意。

我要求你首先使用大功率烙铁，因为它能提供更多热量，用起来更方便。

焊接的步骤可以总结如下：用烙铁加热导线；在保持加热的同时加入焊料；等待焊料开始熔化；再等一会儿，使焊料形成完全熔化的液滴；拿开烙铁停止加热。总过程用时应该在 4~6 秒。

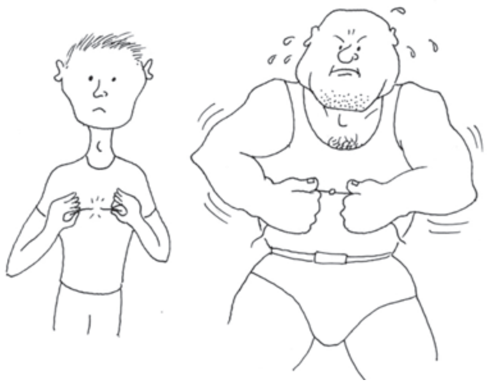


图 3-32　分辨不好的焊接点（左侧）和好的焊接点（右侧）其实不太困难

背景知识：对焊接的误解

误解 1：焊接非常难。已经有成百上千万人学了焊接，他们的能力不可能都比你强。我一辈子都有手颤的毛病，无法稳定地拿住小物体。我还容易对重复性的细节工作失去耐心。如果连我都能焊接元件，那么几乎所有人都能焊接。

误解 2：焊接会释放有毒化学物质，危害健康。你应该避免吸入焊料产生的烟雾，但是漂白剂和涂料等日用品也包含有毒化学物质。使用焊料之后应该洗手，若要彻底清洁，还可以使用指甲刷。但是如果焊接真的对健康有巨大危害，几十年前我们就应该发现电子爱好者的死亡率居高不下。

误解 3：烙铁很危险。烙铁比你用来熨衬衫的熨斗还要安全，因为它发出的热量更少。实际上，根据我的经验，焊接比普通家庭和地下工作室进行的大多数活动都要安全。当然，这不意味着你可以粗心大意。如果摸到烙铁，高温度还是会把皮肤烫伤。

基础知识：八种焊接常见错误

热量不足。焊接点看上去还可以，但是由于没有充分加热，焊料没有充分熔化，它的内部分子结构没有重新排列。焊滴为粒状，而不是坚固、均匀的圆形焊滴，这样得到的焊接点叫**干焊点**，也叫**冷焊点**，你用力拉开两根导线，焊点就会断裂。补救方法是将焊点重新彻底加热，加入新的焊料。

直接用焊滴焊连接点。焊接温度不够的主要原因之一是人们容易先用烙铁熔化一些焊料，然后把焊滴直接滴在要焊的位置。这意味着当你试图用焊滴连接导线时，导线是凉的。你应该用烙铁先加热导线，再把焊料贴近加热。这样，导线的温度就很高，有助于焊料的熔化。

这个问题十分普遍，我要重复提醒。不要用热焊料焊接冷导线，应该用冷焊料去接触热导线。

温度太高。这可能不会损坏焊接点，却会损坏焊接点周围的器件。乙烯基绝缘材料会熔化，使导线裸露，增加发生短路的风险。过高的温度很容易损坏半导体元件，甚至可能熔化开关和连接器内部的塑料元件。损坏的元件必须拆焊并替换，这会花费大量的时间，也非常麻烦。如果你出于某些原因没有焊接好，请暂停，让所有元件都略微降温，再进行下一次尝试。

焊料不足。如此一来，两根导线之间的弱连接可能不够坚固。焊接两根导线时，一定要检查焊接点的下方，观察焊料是否完全渗入。

在焊料凝固之前移动焊接点。这可能会使焊接点断裂，而你不一定看得见断裂的地方。电路可能不会因此停止工作，但是在未来的某一时刻，由于振动或热应力，断裂处可能进一步断裂，破坏电学连接，而那时再追查原因就十分困难了。如果在焊接元件之前用夹子把它们夹好，或者用多孔板固定元件，就可以避免这个问题。

有灰尘或油脂。电气焊料包含的松香可以清洁待焊接的金属，但是污染物仍然会阻碍焊料的黏附。如果元件脏了，在焊接之前，要用细砂纸清理一下。

烙铁头上有碳。烙铁头在使用过程中会逐渐积累黑碳颗粒。它们会阻碍热的传递。按照前文所述的方法清理烙铁头。

材料不适当。电气焊料用于电子元件的焊接，它无法焊接铝、不锈钢或其他各种金属。你也许能把它粘到镀铬的物品上，但也十分困难。

未能测试焊接点。不要假设焊接点焊得很好，一定要施加人工外力进行测试。如果你不能握住焊接点，可以在连接点下方插入螺丝刀片，使焊接点略微收缩，或者用小钳子尝试把焊接点拉开。不要担心毁坏你的作品。如果你的焊接点经受不住粗暴的对待，它就不是一个好的焊接点。

以上八种错误中，干 / 冷焊点是目前为止最糟糕的错误，因为它们很容易形成，而且可能看起来没问题。

背景知识：焊接的替代方法

直到 20 世纪 50 年代，收音机等电子设备内部的连接都是由生产线上的工人手工焊接的。但是电话交换机的迅速发展引发了更快实现大量快速、可靠点对点线路连接的需求，而**绕接法**是一种可行的替代方案。

在绕接电路中，元件安装在一块电路板上，电路板背面伸出长长的、镀金的、边角尖锐的方形引脚。这里使用特制的镀银导线，两端剥除 1 英寸长的绝缘层。手动或电动绕线工具将导线的末端绕在一根引脚上，提供足够的拉力，使导线柔软的银镀层与引脚形成“冷焊”。绕线过程运用足够的压力形成非常可靠的连接，最可靠的是导线绕引脚七至九圈，每一圈都接触引脚的四个角。

在 20 世纪 70 年代和 80 年代，业余爱好者们采用绕接方法制造自己的家用计算机。手工制造计算机的绕线电路板如图 3-33 所示。NASA 曾使用这种技术给阿波罗号登月飞船的计算机绕线，但是如今，绕线法已经鲜有应用。

“通孔”元件（例如早期台式计算机上的芯片）的广泛工业应用促进了波峰焊接技术的发展，波峰焊接技术用机器将一波软焊料送到安装好芯片并已预先加热的电路板下面。遮罩技术能防止焊料粘在不需要的地方。

如今，表面安装元件（比相同功能的通孔元件小得多）用焊膏粘在电路板上，然后加热整个电路板，使焊膏熔化，形成永久连接。

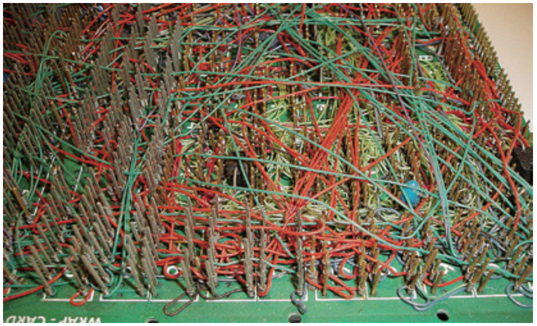


图 3-33　这张图片展示了 Steve Chamberlin 定制的复古 8 位 CPU 和计算机中的绕接线。手工焊接这样繁杂的网络会过度费时，且易于出错。照片来源：Steve Chamberlin

第二个焊接点

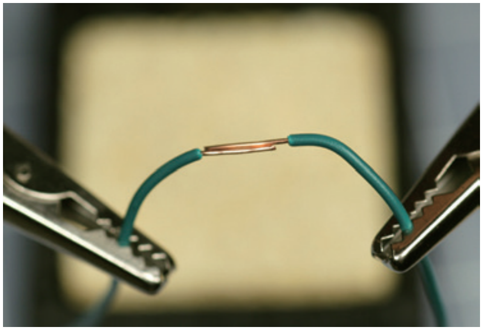
现在该试试你的 15 W 烙铁了。这一次，你仍然必须让烙铁先通电加热五分钟，以保证它足够热。同时，不要忘记拔下另外那把烙铁的插头，把它放在安全的地方冷却。

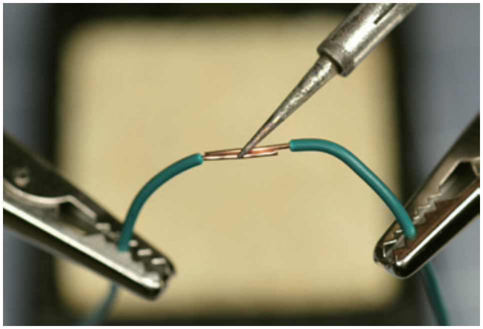
请使用细焊丝焊这个焊接点。功率较小的烙铁需要的热量较少。

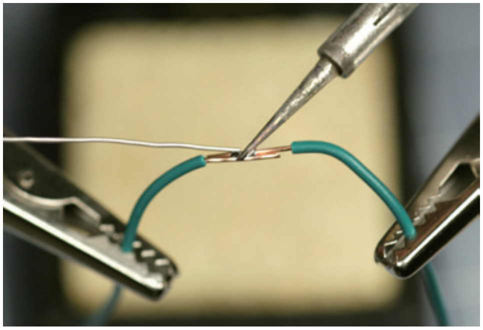
这一次，我想让你把导线互相平行放置。这样比让它们互相交叉更难一些，但这是一个必需技能。否则，你将无法把热收缩管滑动到焊接点上形成绝缘。

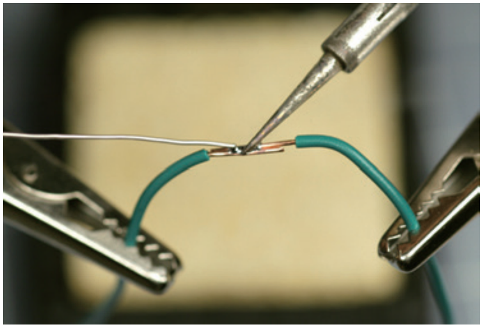
图 3-34、图 3-35、图 3-36、图 3-37 和图 3-38 展示了焊接的五个步骤。起初，两根导线并不需要紧密接触，因为焊料会填满它们之间的小缝隙。但是和以前一样，导线的温度必须足够高，以便焊料流动，你使用低功率烙铁时，可能要多花几秒钟加热。

一定要按照图中所示的方法加入焊料。记住：不要尝试用烙铁尖把焊料送到焊接点上。首先加热导线，然后用焊料接触烙铁尖，同时保持焊料与导线的接触。等到焊料一熔化，它就会急切地流入接合处。如果这个现象没有发生，请耐心等候，再加热一小会儿。


图 3-34　第 1 步：对齐导线


图 3-35　第 2 步：加热导线


图 3-36　第 3 步：继续加热导线，同时加入焊料；请耐心等待焊料熔化


图 3-37　焊料正在熔化，流入接合处

在焊接完成的地方，焊料足够维持强度，但是不足以阻止热收缩管滑过这一区域。我很快就会讲到这个问题。

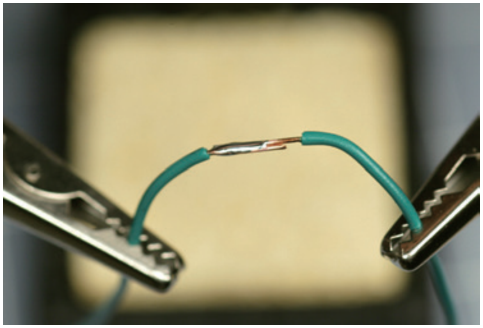


图 3-38 完成的焊接处闪闪发亮，焊料已经扩散到铜线的另一边

理论知识：热传导

你对焊接过程的了解越深，就越容易焊出好的焊接点。

烙铁头的温度很高，你要把它的热量传导给待焊接的点。因此，你应当调整烙铁的角度，使其与元件的接触面最大，如图 3-39 和图 3-40 所示。

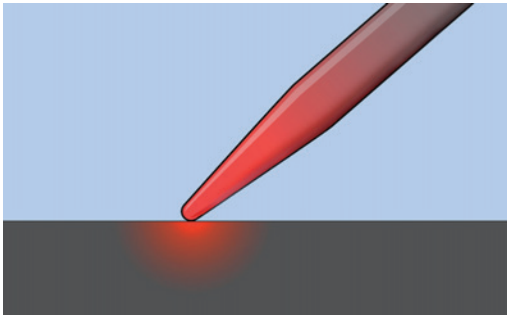


图 3-39 烙铁和工作表面之间的接触面积很小，热传导不充分

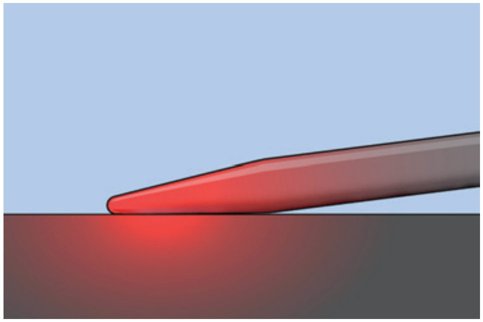


图 3-40 较大的接触面增加了热传导

焊料一开始熔化，它就扩大了接触面积，从而有助于传导更多的热量，焊接过程自然就加快了。使焊料开始熔化才是最困难的部分。

关于热流量，你应当考虑的另一个方面是：它可能会从需要热量的地方吸收热量，而把热量传导到不需要的地方。如果你要焊接一段很粗的铜导线，焊接点的温度可能一直无法升高到能熔化焊料的温度，因为较粗的导线把热量从焊接点传导走了。你可能会发现，连 40 W 的烙铁都不足以克服这个问题。同时，虽然铜芯达不到熔化焊料的温度，但它的温度可能已经足够熔化导线的绝缘层。

一般情况下，如果 10 秒内不能完成一个焊接点，就是因为你施加的热量不足。

给焊接点绝缘

在你成功地焊接了两根平行的导线之后，现在该做一些容易的工作了。选择一些热收缩管，大小刚好应能覆盖焊接处，再留出一点空间。

当然，你并不需要提前规划。你通常需要在焊接导线之前，把热收缩管套到一根导线上。下文中，我会分步说明操作过程，你会明白其中原理的。

假定你已经在一根导线上套好了热收缩管，沿导线滑动它，使管子居中覆盖焊接处。把导线放在热风枪前面，打开热风枪（手一定要远离过热的气流）。转动导线，使两面都得到加热。热收缩管应当在半分钟内，绕导线焊接处紧密收缩。如果管子过热，它可能会过度收缩直至开裂，届时你将必须取下它，重新操作。只要热收缩管收缩紧密，你的工作就完成了，不用继续加热。注意，虽然管子主要沿径向收缩，但是它沿长度方向也会有一些收缩。

图 3-41、图 3-42 和图 3-43 展示了期望的结果。我使用了白色热收缩管，因为它在照片中的显示效果很好。不同颜色热收缩管的性能都相同。

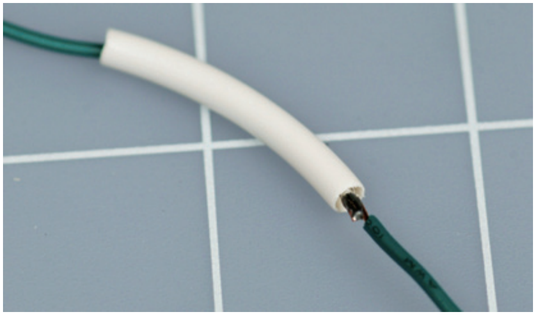


图 3-41　把热收缩管套到焊接处

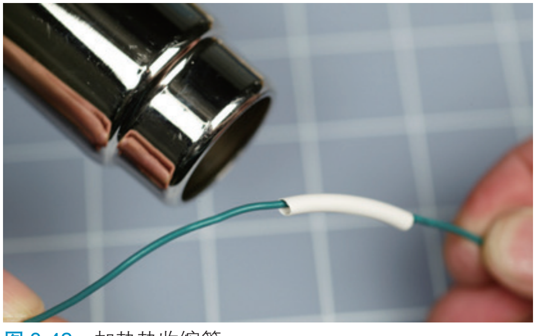


图 3-42　加热热收缩管

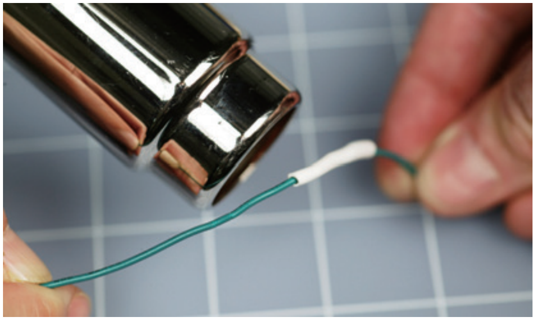


图 3-43　继续加热热收缩管，直至其收缩，紧密覆盖连接处

注意：热风枪确实会变热！

注意全尺寸热风枪尖锐一端的铬钢管。钢比塑料贵，因此生产商使用钢一定有充足的理由——流过钢管的气体温度非常高，会熔化塑料管。

用完热风枪的几分钟内，金属管的温度都足够把你烫伤。而且，和使用烙铁的情况类似，其他人（和宠物）易受伤害，因为他们不一定知道热风枪是危险物品。最重要的是，你要确保家里不会有人误把热风枪当作吹风机使用（如图 3-44 所示）。

热风枪只比它看起来更危险一点。小型热风枪的危险可能略小一点，但是仍然应该小心使用。

给电源接线

焊接技能的下一次应用会更有实用性。你可以把彩色编码的实芯导线连接到交流适配器上。如果你没有适配器，也可以延长 9 V 电池连接器的细导线。无论采用哪种方法，延长的 22 线规导线都能方便地插入面包板中。

你可以使用较大的烙铁进行这项工作，因为这里并不涉及温度敏感元件。

如果你有交流适配器，我就假设它是个直接插在墙上的小塑料模块。适配器引出一对导线，载有你所需的直流低电压，导线末端是某种小插头。插头对于媒体播放器或电话这类有配对插孔的装置很合适，但对于本书的目的来说，插头没有什么用处，因为你需要把电能引入面包板中。

怎么做呢？我将向你展示。

第 1 步：剪切和测量

首先，让我们确认一下你的交流适配器是否正常工作。

现在不要马上把适配器插在墙上。首先剪下低电压导线另一端的小插头，如图 3-45 所示。（你可能注意到这张照片上是 RadioShack——美国无线电器材公司的适配器。啊，它已成为回忆。）

把两根连接线分开，使用剪线钳或美工刀，剥下每根线约 1/4 英寸长的绝缘层，如图 3-46 所示。两根线应该不等长，以减少相碰的风险。

如果在适配器插入电源插座时两根裸露的导线接头相碰，它们可能会引起超载或烧毁内部的保险丝，也可能会出现令人不安的电火花，我觉



图 3-44　热风枪和吹风机并不太一样

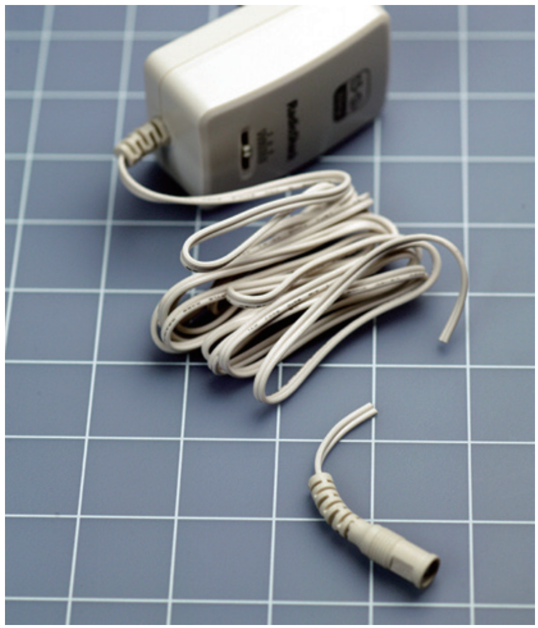


图 3-45　自制交流适配器的第 1 步

得它可能会伤到你。虽然不是什么大事，但也很麻烦。

现在把万用表设置为测量直流电压，把它连接到交流适配器的两根输出连接线上，建议使用带弹簧夹的测试引线，以使一切尽在控制之下。进行两次检查，确保红色表笔插入万用表上的电压插孔而不是 mA 插孔。将交流适配器插在墙上，测量它提供的电压大小。

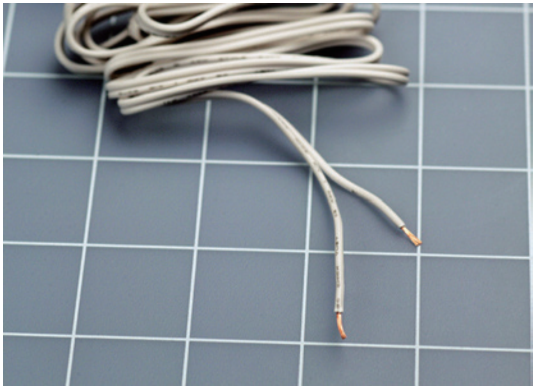


图 3-46　剥除绝缘层的导线

如果万用表的读数高得奇怪，可能是因为交流适配器在未给器件供电时输出的电压通常较高。万用表的内阻非常高，因此适配器的表现就如同没有任何负载一样。

现在来做一个更有意义的测试，选择一个阻值 680 Ω 的电阻器，把它夹在适配器的输出连接线两端，与万用表并联。这样会把适配器的输出电压拉低到更合适的水平上。现在你测得的值就合理了。

最好不要使用阻值远小于 680 Ω 的电阻器，因为你购物清单上的电阻器额定功率只有 1/4 W，如果让它们负载更大的功率，就会过热。680 Ω 的电阻器连接到 9 V 电源两端，欧姆定律告诉我们流过它的电流为约 13 mA，因此功耗将为约 120 mW（0.12 W），远小于电阻器 0.25 W 的额定功率。

如果你想知道交流适配器输出的电压是如何随较低的阻值而变化的，可以将几个 680 Ω 的电阻器并联连接。这个测试可能非常有趣，但是还请先回到我们的主要目的上来——为你的面包板获取电能。

第 2 步：焊接

这里要使用万用表检测，绝对确保测得的交流适配器连接线输出电压前面没有负号。如果有负号，就把万用表表笔反转过来。

如果万用表的读数为正数而非负数，那么万用表的红色表笔连接到的是交流适配器的正极一侧。这一点很重要，因为你不希望电源连接方向错误导致电路中的元件损坏。

无论你向交流适配器还是 9 V 电池连接器上连接实芯 22 线规导线，下一步都是相同的。

剪下两段实芯 22 线规导线——一根为红色，另一根为黑色或蓝色，每根导线长约 2 英寸。剥除每根导线两端 1/4 英寸长的绝缘层。

利用先前练习的焊接技术，把 22 线规的导线与交流适配器或电池连接器上的导线焊接在一起。红色导线与电源正极一侧自然要相连。

如果你有热收缩管和热风枪，就按照练习时的方法使用它们。最终结果应当如图 3-47 所示。此处，导线也不要等长，以减少它们相碰的风险。工作完成后，你可以把 22 线规的导线末端插入面包板中。

修剪电源线

利用你新学会的焊接技能还可以做些什么呢？这里有一个建议。不使用苹果产品的人可能会有这样的笔记本电源：除了插入电脑的低压直流线以外，还有一根可拆卸交流电源线，用来插入壁式电源插座。典型电源线如图 3-48 所示。

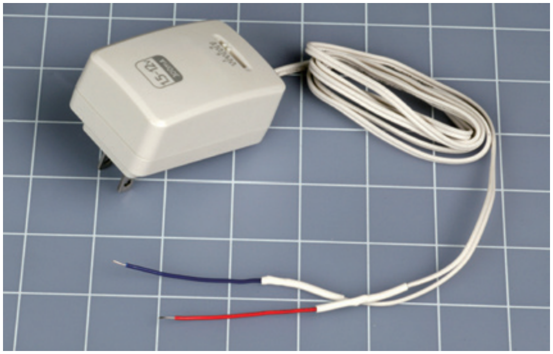


图 3-47　22 线规的导线可以插入面包板中，为其提供电能



图 3-48　非苹果笔记本电脑上的可拆卸交流电源线

那么如果你是果粉呢？也许其他设备上有可拆卸电源线，例如打印机或扫描仪。本实验的目的是缩小电源线的长度，使其完全符合你的要求，而不是缠作一团。而且，如果你和我一样，感觉笔记本电脑电源线太长，而你又想轻装出行，本实验就非常有用。

12 步修剪电源线

图 3-49 展示了第一个步骤：大胆地用剪线钳剪断电源线。不用说，以下各步骤都有一个要求。对电源线进行操作时，**插头不能插在插座上**。

图 3-50 展示了你想要保留的两段电源线。你可以把剪下来的电源线中段存起来，以备将来之需。

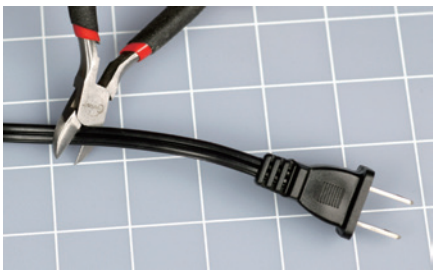


图 3-49　第 1 步



图 3-50　第 2 步

图 3-51 中，安装在切割垫上的美工刀是分开每段电源线上的两条导线的简便工具。

图 3-52 中，电源线的每条导线都经过了修剪，使它们能够两两匹配，但长度不等。这样，当你把它们重新连接起来时占用的空间会更少，而且如果一个连接点由于某种原因出了问题，发生短路的风险也较小。

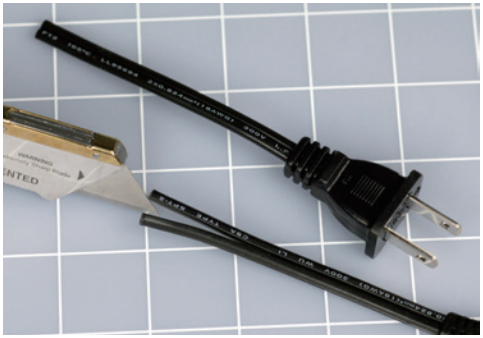


图 3-51　第 3 步



图 3-52　第 4 步

注意，有一根导线上总是带有标记，或者是印刷文字，或者是模压脊线。在连接时，要确保带标记的导线互相匹配。

剥去很短的一段绝缘层，只要 1/8 英寸就足够了。然后，如果有热收缩管，就剪下来几小段。每段较细的热收缩管必须正好套住电源线的每根单导线，而较粗的热收缩管（长约 2 英寸）将覆盖所有的连接点，如图 3-53 所示。

注意，有些热收缩管只能在较低的额定电压下工作，不能用于此实验。

下面是最困难的部分：激活你的记忆。你要记得在焊接之前把热收缩管套到导线上，因为导线两端的插头会阻碍你之后再添加热收缩管套。如果你像我一样心急，就很难每次都记得住。如图 3-54 所示。



图 3-53　第 5 步



图 3-54　第 6 步

用辅助工具协助焊接第一个焊接点。把两段导线推到一起，使导线芯混合，然后用手指捻紧导线芯，不让一点线芯探出来。当热收缩管受热变软，沿焊接点周围收缩时，突出的导线芯会刺破热收缩管。如图 3-55 所示。

你正在连接的电源线比之前连接的 22 线规导线粗得多，因此它会吸收更多的热量，你需要让烙铁头接触更长的时间。要确保焊料一直流进了焊接点，并在焊接点冷却下来后检查它的下面，你很有可能会在那里发现一些裸露的铜线芯。焊接点应当是坚固、圆形、闪亮的一团，如图 3-56 所示。

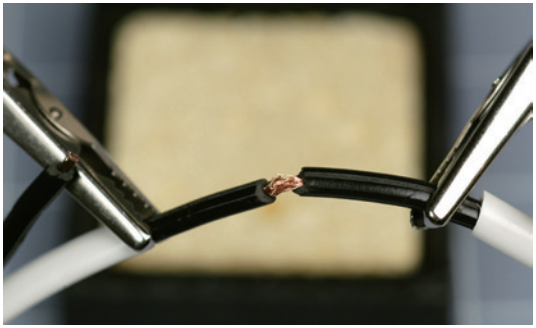


图 3-55　第 7 步

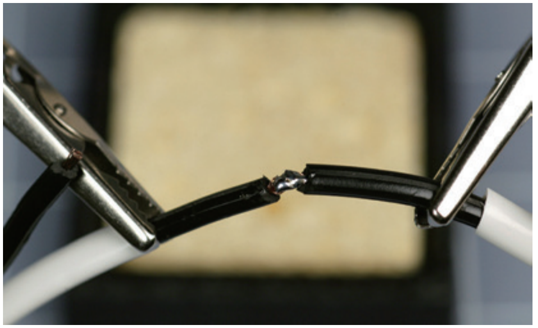


图 3-56　第 8 步

一定要注意，在使用烙铁时，要使热收缩管与焊接点保持尽可能远的距离，这样烙铁的热量就不会过早使管子收缩，妨碍你后面再滑动它。

把一段热收缩管滑动到焊接点上，使用热风枪加热，如图 3-57 所示。不要让其他热收缩管吸收逸散的热量。

在图 3-58 中，热收缩管已经收缩。



图 3-57　第 9 步



图 3-58　第 10 步

准备好焊接另一段导线，如图 3-59 所示。

图 3-60 展示了焊好的第二个焊接点。用它自己的一小段热收缩管做好保护后，你就该用较大的那段热收缩管套住所有的焊接点了。那么——你记得一开始就把它套在导线上了吧？

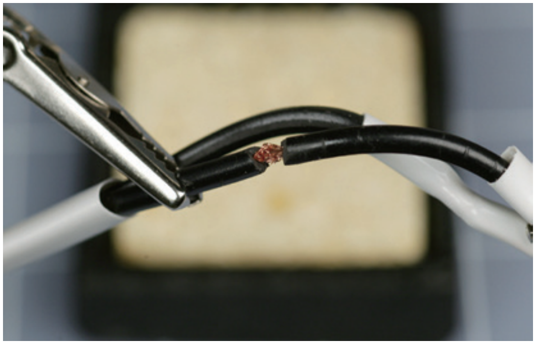


图 3-59　第 11 步

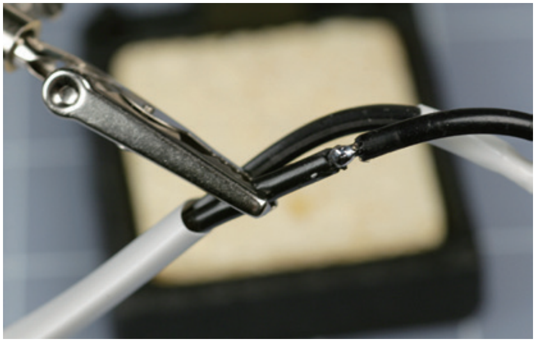


图 3-60　第 12 步

图 3-61 展示了修剪完成的电源线。

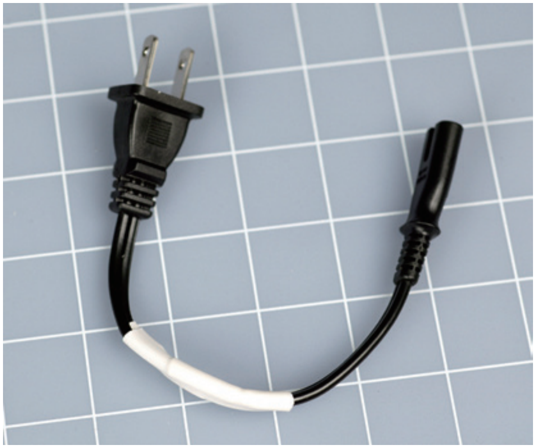


图 3-61　修剪完成的电源线

下面做什么？

如果已经完成了目前为止的所有焊接练习，你就拥有足够的基本技能，可以焊接自己的第一个电路了。但是——可能我们首先应当快速浏览一下无意间导致元件过热的后果。你费了很大力气把元件焊接到一起，却发现不小心熔化了一个晶体管或 LED——我可不愿意发生这种事情。给损坏的元件拆焊远不如焊接元件那么有趣。

实验 13：烧烤 LED

在实验 4 中，你发现烧毁一个 LED 是多么简单。在那次小冒险中实际发生的事情是：过大的电流流过 LED，产生了过多的热量，损坏了 LED。

如果电流产生的热量会烧毁 LED，那么烙铁产生的热量是否也会有同样的效果呢？似乎很可能，但是只有一种方法能够完全印证你的猜想。

需要的物品

- ❒ 长尖嘴钳（或尖嘴钳）、30 W（或 40 W）烙铁、15 W 烙铁
- ❒ 辅助工具（用于夹持元件）
- ❒ 纯铜弹簧夹，一大或两小
- ❒ 9 V 电池和连接器，或 9 V 交流-直流适配器
- ❒ 通用 LED 2 个
- ❒ 470 Ω 电阻器 1 个

本实验的目的是研究热量的影响。这意味着我们需要了解热量的流动路径。

因此，本实验不使用面包板，因为面包板内部线路吸收的热量未知。我也不建议你使用测试引线，因为它们也会吸热。

请使用尖嘴钳把 LED 和 470 Ω 电阻器的每个引脚弯成小钩，如图 3-62 所示，9 V 电池的连接线也弯成了钩状。为使它们保持形状，你可能需要剥除一段绝缘层，做一点焊接工作。

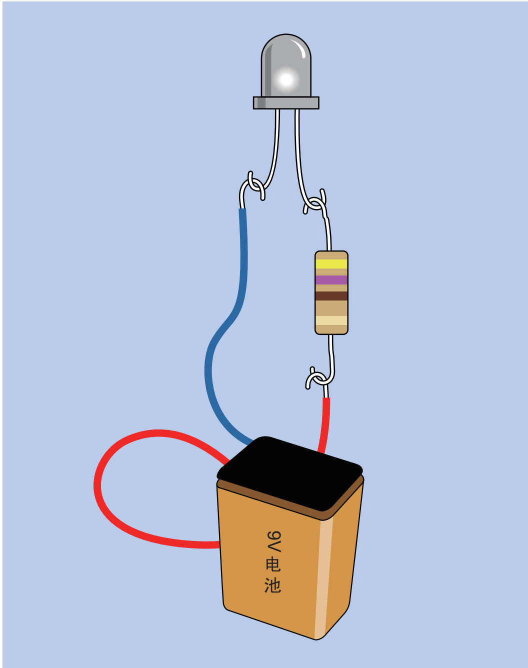


图 3-62　测量 LED 的耐热性。9 V 电池可换成交流适配器

为了使传导过程中的热量损失最小，电阻器悬挂在 LED 的一根引脚上，靠下一些，电源线又挂在电阻器的引脚上。重力足够支持这个系统。

用辅助工具夹住 LED 的塑料器身。塑料是热的不良导体，因此 LED 的器身不会使太多的热量通过辅助工具传导走。

加上 9 V 电压，LED 就会闪闪发亮。本实验中，我使用了白色 LED，这样方便拍照。

你需要用到低功率 15 W 烙铁和高功率烙铁。插上插头，等待至少五分钟，确保烙铁足够热。现在，把 15 W 烙铁的尖端用力压在发光的 LED 的一根引脚上，同时用手表计算时间。图 3-63 展示了实验设置。

我打赌你能连续按压三分钟也不会烧坏 LED。现在你知道了，为什么我推荐使用 15 W 的烙铁进行精密的电子学工作。

让 LED 的引脚冷却一会儿，再用功率更大的烙铁压在同一位置上。我认为 LED 十秒钟后就会熄灭（注意，有些 LED 能承受更高的温度）。因此，30 W 烙铁不用于精密的电子学工作。

较大功率的烙铁的温度不一定比小烙铁更高，它只是热容量较大。也就是说，它可以更快地提供更多的热量。

你的 LED 为知识而献身了，它死得光荣。让它在垃圾桶里长眠吧，再换上一个新的 LED，这次我们要更友好地对待它。连接方法照旧，但是这一次添加一个大号的铜质弹簧夹（或两个小夹子），夹在 LED 器身附近的一根引脚上，如图 3-64 所示。把 30 W 或 40 W 烙铁的尖端按在弹簧夹以下的引脚上。这一次，你应该能连续用大烙铁加热两分钟，也仍不会烧坏 LED。

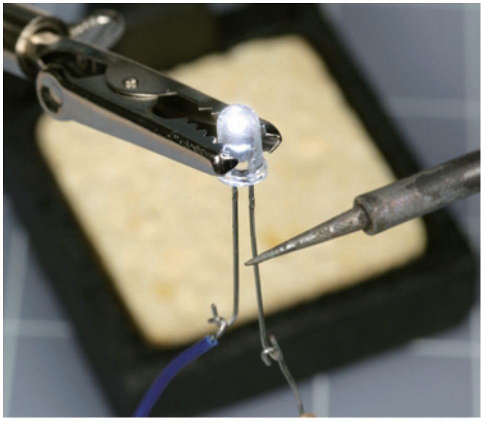


图 3-63　用 15 W 烙铁加热 LED 引脚

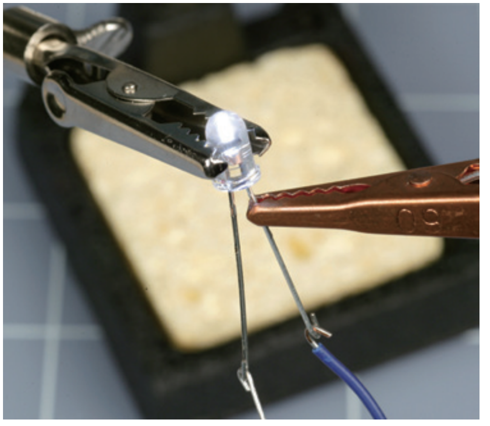


图 3-64　以铜质弹簧夹为散热器保护 LED

热量都去哪儿了

实验结束后触摸弹簧夹，你会发现它比较热，而 LED 仍然不太热。想象一下，热量从烙铁头流出，流入与 LED 相连的导线——除非热量在途中遇到了弹簧夹，它会改变路径，如图 3-65 所示。弹簧夹就如同等待加满的空容器，热量更喜欢流入弹簧夹，而留下 LED 完好无损。

弹簧夹的功能相当于散热器。它比平常使用的镀镍钢质弹簧夹效果更好，因为铜是热的优良导体。

回到本实验的第一部分，你发现，在没有散热器的情况下，15 W 的烙铁也没有损坏 LED。这是否意味着 15 W 的烙铁绝对安全呢？

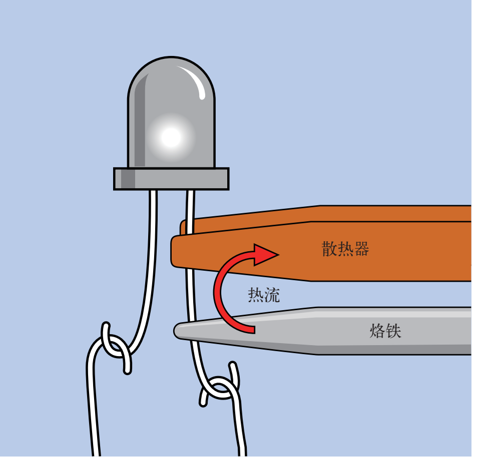


图 3-65　铜质弹簧夹传导走了流向 LED 的热量

这是有可能的。不过，你并不一定知道是否有些半导体元件对高温比 LED 更敏感。

由于烧毁元件的后果实在太烦人，因此我建议你稳妥行事，在这些情况下使用散热器。

- ❐ 15 W 烙铁贴近半导体元件 20 秒或更久。
- ❐ 30 W 烙铁接近电阻器或电容器半英寸以内 10 秒或更久。（一定不要靠近半导体元件。）
- ❐ 30 W 烙铁靠近任何可熔化的物体 20 秒或更久。可熔化的物体包括导线绝缘层、塑料连接器和开关内部的塑料元件。

散热器使用规则

- ❐ 大型铜质弹簧夹的效果最好，但可能不适合狭窄的地方。你最好同时准备好小弹簧夹。
- ❐ 把弹簧夹尽量夹在离元件近的位置，离焊接点尽量远一些，因为焊接点确实会很热。要转移的是元件的热量，而不是焊接点的热量。
- ❐ 确保在弹簧夹和导线之间形成了金属-金属连接，以促进良好的热传导。

记住以上几点，我们就可以继续挑战有趣的点对点接线了。

实验 14：可穿戴的脉冲发光体

到目前为止，我一直在鼓励你把各种器件连接到一起，却没有太多的理论或计划。“发现学习法”就是这样。但是，有时候计划可能至关重要，本实验就是其中一例。我将概述本实验的要求，然后带你一步步实现目标。

需要的物品

- ❐ 连接线、剪线钳、剥线钳、万用表、15 W 烙铁、辅助工具
- ❐ 9 V 电池和连接器，或 9 V 交流-直流适配器
- ❐ 细焊丝（0.022 英寸）
- ❐ 普通多孔板（必须没有镀铜）
- ❐ 电阻器：470 Ω 2 个、100 kΩ 1 个、4.7 kΩ 2 个、470 kΩ 2 个
- ❐ 电容器：3.3 μF 2 个、220 μF 1 个
- ❐ 2N2222 晶体管 3 个
- ❐ 通用 LED 1 个

复习振荡现象

请翻回到图 2-116，重拾对这个电路的记忆。现在，你的任务是把它做得尽可能小，这样就可以

把它戴在身上了。

想象一下，各元件的引脚都以橡皮筋互相连接，允许你在桌面上随意摆放，又不会丢失元件之间的连接。当橡皮筋的拉伸长度尽可能短，电路就变得尽可能小，你就可以用裸导线连接各个部件，把它们连在一片多孔板上。

唯一的问题是多孔板下面的裸导线互相不能交叉。其中的理念是：在核实了电路的功能之后，可以把电路规格发送给蚀刻电路板的服务商。

当然，现代的印制电路板至少有两面，而且多数都有中间层，允许多根导线互相交叉而不形成电接触。但是从简单、传统的基础开始总是要好一些，最简单的电路板一侧是元件，另一侧是各种连接。电路板顶端的元件可以与下方的导线桥接，电路板的绝缘材料把它们分隔开来。但是导线不能彼此相交。

图 3-66 展示了我为减小电路尺寸进行的一次最成功的尝试，电路搭建在一片 0.9×1.3 英寸的普通多孔板上。如果你能设计出更小的电路，我将很愿意看到你的成果。以下是一些方法。

- ❐ 使用额定功率 1/8 W 的小电阻器，而非 1/4 W 的电阻器。
- ❐ 垂直安装电阻器。
- ❐ 如果多孔板上的孔足够大，把两根引线穿在同一个孔里。

元件之间的连接线在哪里呢？在板子下面。在图 3-67 中，我把元件画成了灰色，略去了板子，这样你就可以看见接线方法了。

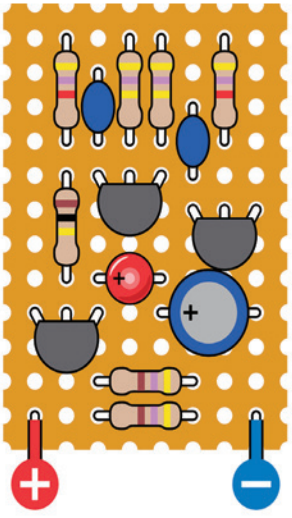


图 3-66　振荡器电路，缩小了体积，在多孔板上占用尽量小的空间

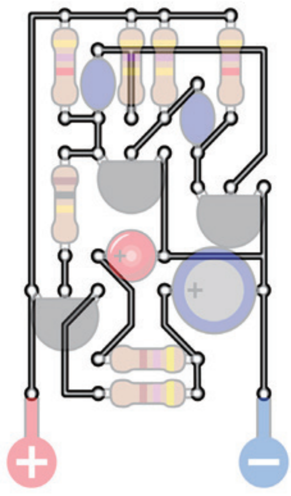


图 3-67　黑色的连接线是电路板下方的导线，此视图中，电路板是透明的

如果将这幅电路图非常仔细地与图 2-116 中的电路图相比较，你会发现，元件间的连接方式完全相同——除非我犯了错误。（我希望没有，我可不想把每件东西都重画一遍。）

图 3-68 展示了另一种视图，这一次略去了元件，只显示电路板，这样你就能明白连接线如何适应了电路板上 0.1×0.1 英寸的小孔网格。

最后，图 3-69 展示了向右翻转的电路板，这样你就看见了它的背面。这张图将帮助你连接电路元件。你一定会试一试的，对吧？

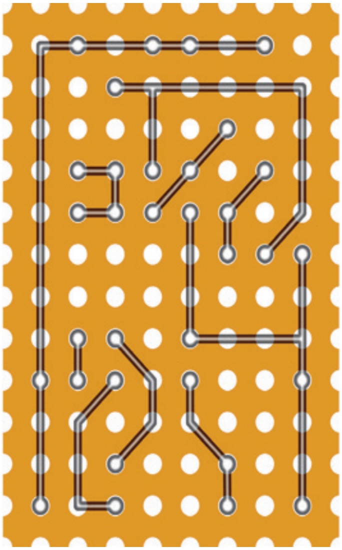


图 3-68　此视图只显示了电路板和连接线，每个小圆点表示一根穿过电路板的连接线

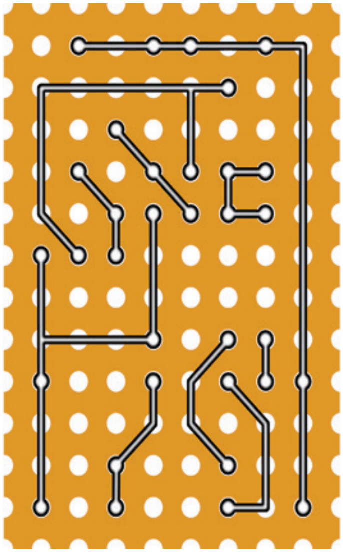


图 3-69　上一幅图中的连接线向右翻转，因此此图展示的是电路板背面的连接方法

弯曲引脚并焊接

既然已经知道了本实验的计划，那么你应该如何进行所有的连接呢？

这并不困难。电阻器、电容器和晶体管的引脚通常至少长 1/2 英寸。因此，你可以把它们插入多孔板上的小孔内，然后弯曲引脚，使它们互相接触，再把它们焊接在一起。剪掉多余的引脚，连接电池，工作就完成了。

你需要注意三个主要问题。

❑ 使电路板在工作时保持稳定需要一定的谨慎和耐心。使用辅助工具很有必要。

❑ 元件和焊接点之间的距离将非常近，请使用铜质弹簧夹提供散热保护。

❐ 把电路板翻来覆去很麻烦，你很容易把导线连错位置。我认为这才是最困难的部分。

或许你见过这样的多孔板：每个小孔周围都加了一圈铜。这样的多孔板适合本实验吗？铜圈的有点是可以牢固固定元件，但是它们也能在距离很近的导线之间形成短路。我认为裸电路板对于这样的一个小项目来说更容易一些。图 3-22 展示了一个例子。有些多孔板上的孔更大，但是并没有太显著的差异。

按步操作

以下是搭建电路的具体步骤。

裁下一块普通多孔板，大小为 0.9×1.3 英寸。（不需要用有刻度的尺子，数好板子上孔的排数就行。）你可以用小型手锯切割，如果你很细心，也可以沿着一排小孔把板子剪下来。钢锯也可以。建议不要使用木锯，因为多孔板内部通常有玻璃纤维，会使木锯变钝。

准备好所有的元件，仔细地把三四个元件插入小孔，数一数孔的个数，确保元件的位置正确。把板子翻过来，弯曲元件的引脚，使它们固定在板子上，做成如图 3-69 所示的连接。如果有的引脚不够长，你就得用一段 22 线规的导线来补充。要剥除导线的绝缘层，因为绝缘层有阻碍作用。

用剪线钳大概修剪一下导线。

用烙铁进行焊接。

现在是最重要的部分：用近距离放大镜检查每个焊接点，用尖嘴钳扭动导线。如果焊料不够，不能形成牢固的焊接点，就重新加热，再加一点焊料。如果焊料形成的连接位置有误，你可以用美工刀在焊料上平行切两刀，刮除中间的部分。

通常，我一次只焊接三四个元件，因为如果数量太多，我就容易糊涂。如果我把一个元件焊错了位置，改正错误还不太困难——除非我在发现错误时已经又焊上了更多元件。

注意：迸飞的导线段

剪线钳的钳口力量很大，在剪断导线时，力量会达到顶峰，然后突然释放。这种力量会转化为被剪下的导线段突然具有的动能。有些导线比较软，不会造成威胁，但是晶体管和 LED 的引脚比较硬，可能有危险。小段导线会以不可预知的角度高速飞出，在你进行近距离工作时，对眼睛十分危险。

普通的眼镜能在修剪导线时保护你的眼睛。如果你不戴眼镜，使用塑料护目镜也是非常好的方法。

完成工作

我通常使用明亮的灯光照明。这并不是奢侈，而是必需。如果你还没有台灯，就买一盏。台灯不需要很昂贵，便宜的就可以。

我使用日光光谱 LED 台灯，因为它能帮助我更可靠地辨认出电阻器上的色带。我原来用的是荧光台灯，当我发现灯管涂层上的任何小瑕疵都会让紫外线泄漏出来之后，我就不再用它了。近距离在灯下工作时，紫外线辐射会构成威胁。

无论视力有多好，你都应该用放大镜检查每个焊接点。你将会对某些焊接点的不完美程度感到吃惊。把放大镜尽量靠近眼睛，然后拿起电路板，慢慢靠近放大镜，直到你观察的焊接点变得清晰为止。

最后，你做成的电路发出的脉冲应当像心跳一样。是不是？如果电路不能工作，请回头检查每个连接点，将其与电路图比较。如果没有发现问题，就给电路加上电源，将万用表的黑色表笔与负极连接，用红色表笔检查电路各点的电压。电路工作时，各部分都应该至少具有一定的电压。如果你发现有的连接点处电压为零，可能是因为焊接点断裂了，或者根本没有焊接。

做完电路后，又该干什么呢？现在你可以从电子学爱好者转变成手工艺爱好者了。你可以试着想出一个方法，把电路做成可穿戴的器件。

首先需要考虑的是电源。由于所用元件的要求，电路需要 9 V 电源才能正常工作。如何在带着一个庞大的 9 V 电池的情况下把这个电路改造成可穿戴器件呢？

我想到了三种方法。

❒ 可以把电池放在口袋里，把闪光装置安装在口袋外面，一根细导线穿过口袋。

❒ 可以把电池安装在棒球帽的帽顶里面，闪光装置安装在前面。

❒ 可以把三节 3 V 纽扣电池摞在一起，放在塑料夹子里，但是我不确定它们能用多长时间。

我必须说明一下，本实验的 2N2222 晶体管并不理想，因为它们使用的电能比场效应晶体管（也叫 MOSFET）更多。但是，我决定在本书中只使用一个类别的晶体管，而双极型 NPN 型晶体管是最基本的类型。

再说一说 LED 的选择。器身透明的 LED 会产生边界清晰的光束，对于此实验可能不太适合，而漫射光束更惹人喜欢。为了扩散 LED 的光束，你可以把 LED 装在一块厚度至少为 1/4 英寸的透明丙烯酸塑料中，如图 3-70 所示。用细砂纸把丙烯酸塑料的外表磨粗糙，最好使用旋转式砂光机，它不会磨出明显的图案。这样，丙烯酸塑料就变得半透明。

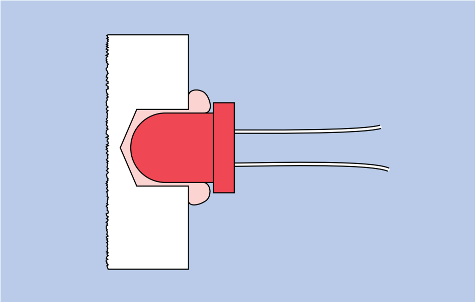


图 3-70　这张横截面图展示了一块透明的丙烯酸塑料，从塑料的后面向前钻了一个孔，不钻透。因为钻头钻出的孔底部是圆锥形，而 LED 的轮廓为圆形，所以可以在安装 LED 之前，把透明环氧树脂或硅树脂注入孔中，填满缝隙

在丙烯酸塑料的背面钻一个比 LED 略大的孔，但不要钻透。向孔中吹入一些压缩空气，清除孔中的碎屑和尘土。如果你没有空气压缩机，用水冲洗也可以。在钻孔完全干燥后，用一些透明的硅树脂或混合一些透明的五分钟即干环氧树脂，滴一滴在钻孔的底部。

然后把 LED 推入钻孔中，让环氧树脂填满 LED 周围，形成严密的密封。

点亮 LED，如果有必要，继续用砂纸打磨丙烯酸塑料。最后，你可以决定把电路安装在丙烯酸塑料的背面，还是引出一根导线连接到别的地方。

你可以选择振荡器电路中的电阻器阻值，使 LED 的闪烁频率接近人体静止时心脏跳动的频率。这样整个器件看起来就像正在测量你的脉搏，如果你把器件装在胸膛中央或用带子绑在手腕上，那就更像了。如果你喜欢恶作剧，就可以宣称自己的身体简直太好了，甚至连你进行剧烈运动时，脉搏都能保持恒定。

为了给器件做一个美观的外壳，我考虑了几种方案，从把整个器件安装在透明环氧树脂中到寻找维多利亚风格的小盒，等等。其他选择方案就留给你自己考虑吧，因为这是一本电子学教材，而不是手工艺教材。但是，我还要说明一个与手工艺有关的问题，而现在正是好机会。

背景知识：让人抓狂的度量制

本书中，我主要使用英寸为度量单位，但是有时我也冒险使用公制度量单位，例如“5 mm LED”。不是因为我个人没有做到统一，这反映了电子工业矛盾的现状：日常生活中英寸和毫米都很常用，经常在同一张数据表上出现。例如，表面安装芯片的引脚间距通常用毫米表示，但通孔芯片的引脚间距仍然表示为 0.1 英寸，并且可能一直保持下去。

使事情更复杂的是，在使用英寸的场所，分数的英寸有两种不同表示方法。例如，钻头的尺寸用 1/64 英寸的倍数表示。金属垫片以 1/1000 英寸的倍数（0.001 英寸、0.002 英寸，等等）划分等级。更令人困惑的是，金属片的厚度通常用“线规”表示，例如 16 线规钢片的厚度大约为 1/16 英寸。

为什么美国不改用公制度量系统呢？公制看起来更加合理啊！

我们可以讨论一下它的合理性。当公制度量系统于 1875 年正式提出时，“米”的定义是沿一条穿过巴黎的线，从北极到赤道之间距离的 1/10 000 000。为什么是巴黎？因为这个概念是法国人提出的。从那以后，经过一系列为提高科学应用中的精度而进行的努力，“米”又被重新定义了三次。

说到十进制系统的实用性，移动一个小数点当然比计算一英寸的 1/64 更简单，但是我们使用十进制的唯一原因是我们恰好习惯了用十个手指计算。十二进制系统确实更方便，因为数字可以被 2 和 3 整除。

以上内容均为猜想。事实是，我们无法摆脱长度测量的矛盾，所以我画了四张表格，帮助你进行系统间的转换。从表格中你能看出，若需要为 5 mm 的 LED 钻一个孔，3/16 英寸的钻头比较合适。（实际上，这个孔比真正以 5 mm 钻出的孔更小。）

图 3-71 将帮助你在 1/64 英寸和 1/100 英寸的倍数间转换。灰色的一列被均分成 64 份，蓝色的一列分成 32 份，绿色的一列分成 16 份，橘黄色的一列分成 8 份。通常，如果一个值可以用较大的单位精确表示，我们就采用这种表示方法；因而我们不说一英寸的 8/64，而说一英寸的 1/8。在你试

图比较两个测量值孰大孰小时，这种表示方法又会引发混乱——例如，11/32 英寸比 5/8 英寸大吗？请查看图表以证实猜测。

因为数据表经常使用单位为英寸的十进制小数表示尺寸，所以图 3-72 中的第二个表格进行了十进制和 64 进制之间的转换。你很有可能见到 0.375 英寸这样的测量值，要知道它等于 3/8 英寸，类知识非常有用。

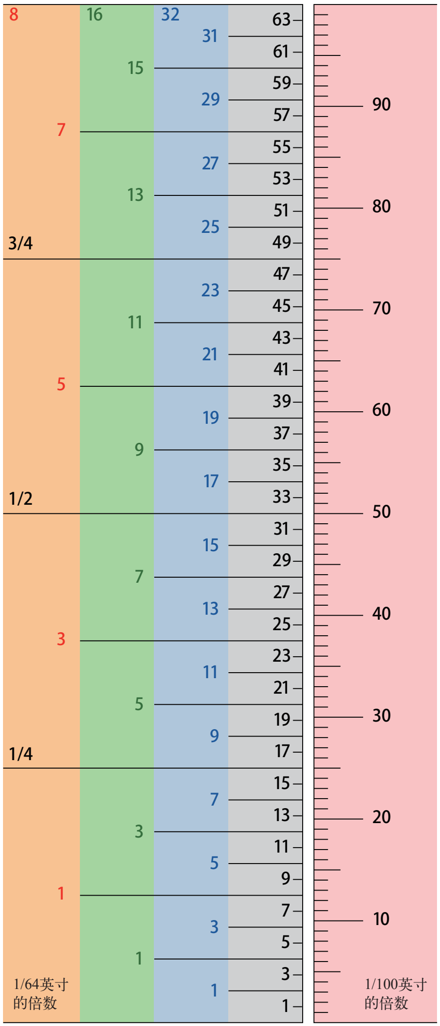


图 3-71　1/64 英寸和 1/100 英寸的倍数之间的转换

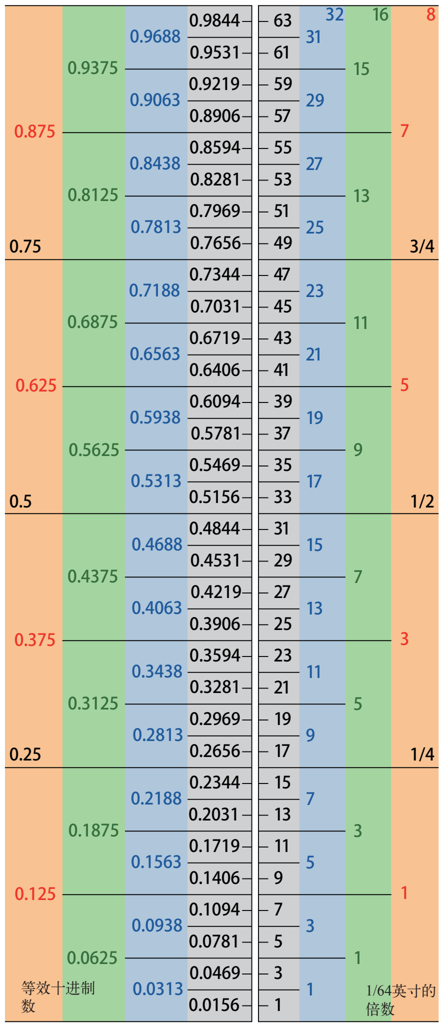


图 3-72　十进制和 1/64 英寸的倍数之间的转换

很多数据表同时提供毫米和英寸测量值，但一些数据表现在只使用毫米表示。如果你仍然习惯用英寸思考，或者想知道元件是否适合面包板或多孔板上 1/10 英寸的孔间距，那么牢记 1/10 英寸等于 2.54 mm 将十分有用。假如元件很小，那么 2.5 mm 倍数的引脚间距可以接受。但是，不小于 25 mm 的引脚间距可能不适应间距为 25.4 mm（即一英寸或以上）的孔。

图 3-73 展示了毫米、1/100 英寸的倍数和 1/64 英寸的倍数之间的转换关系。

图 3-74 是图 3-73 的放大版，展示了 0.1 mm 的倍数和 1/1000 英寸的倍数之间的转换关系。

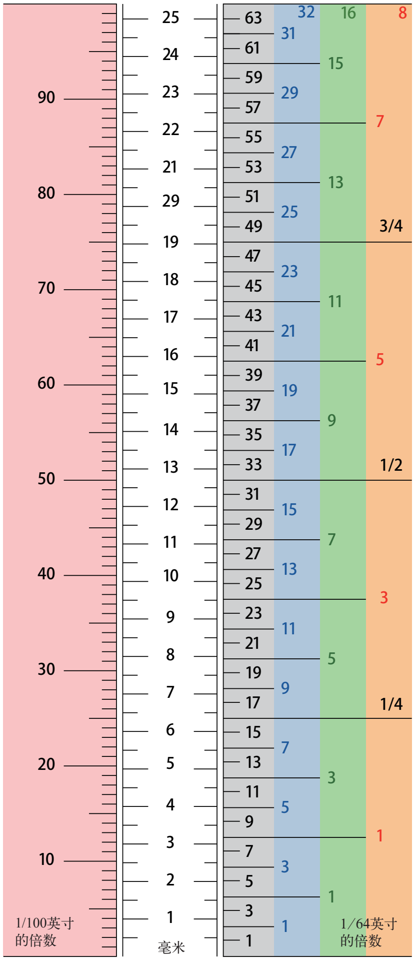


图 3-73　美国度量标准和公制度量标准（毫米）之间的转换

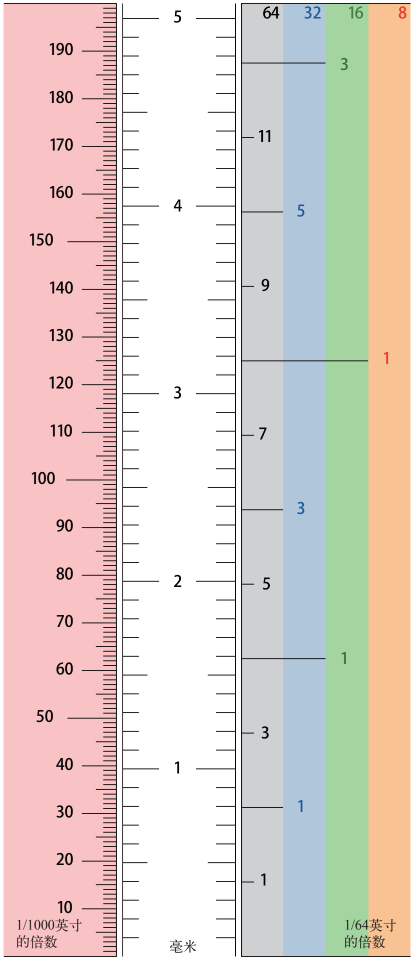


图 3-74　更小的美国度量标准和公制度量标准（0.1mm）之间的转换

过去四十年中，美国在采用公制度量系统方面作出了一些进步，但是转换完成还需要数十年时间。在此期间，任何使用美国生产或销售的零件或工具的人员都应该熟悉这两种度量系统，除此之外没有其他的方法。

实验 15：防入侵报警器（第一部分）

现在是时候利用你已经掌握的知识进行实验，并应用这些知识制造出一件简单而可用的产品了。你可能觉得自己并不需要防入侵报警器，但是学习它的制造方法会对你在现实生活中搭建电路、完成任务起到很好的引导作用。

我要提醒你，从零开始设计电路经常会遇见意料之外的问题和错误，如果假装这些问题不存在，就会产生误导。因此，在下面的各个实验步骤中，你将至少遇见一个挫折和逆转——直到我们最终做成可靠、能工作的系统为止。

需要的物品

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 电池和连接器，或 9 V 交流-直流适配器
- ❒ 通用 LED 1 个
- ❒ 2N2222 晶体管 1 个
- ❒ 双极双掷 9 V 直流继电器 1 个
- ❒ 1N4001 二极管 1 个
- ❒ 电阻器：470 Ω 1 个、1 kΩ 1 个、10 kΩ 1 个

愿望清单

这个实验很复杂，需要一个计划。但是在制定计划之前，我先要知道我需要什么，因此我必须写出一个“愿望清单”。在列清单的过程中，我还将设想前面实验用到的元件应当满足什么要求。

那么，防入侵报警器由哪几部分组成呢？

1. 要有触发系统。 设备需要检测是否有人进入了房屋。使用激光束或超声波的系统很酷炫，但是难以实现。因为这是第一次尝试，所以我将使用容易买到的门窗磁传感器开关。

2. 要发出声响。 报警器应该发出某种有特色、引人注意的振荡声波。

3. 要有防干扰功能。不让别人通过剪断导线遏制报警器报警。实际上，干扰应当触发报警器报警。

4. 要串联传感器。为了使系统防干扰，我可以让一股很小而恒定的电流流过多个串联的常闭型传感开关。任何一个开关断开，或者导线断裂，电流就会受到干扰，从而触发报警器。我认为大多

数有线报警器都是基于此原理设计的。

5. 要有开-关转换。如果我使用串联传感器，由开关断开或电路中断引发的“关”事件必须触发报警器。或许双掷继电器可以做到这一点。通过继电器线圈的电流使一对触点断开，电流一消失，触点就默认闭合。但是继电器保持触点断开状态将消耗巨大的电能，而我希望报警系统在“待机”模式下通过的电流很小，这样它就可以用电池供电了。报警系统一定不能完全依靠住宅交流电供电。

6. 用晶体管可以吗？如果我不用继电器，电路断开时，晶体管也可以触发报警器。晶体管的基极可以一直保持在较低的电压，直到电路断开为止。然后电压升高，晶体管导通。

7. 要装备报警器。我需要一盏小灯，当所有的门窗关闭时，灯会亮起，提醒我报警器可以使用了。然后我要按下一个按钮，开始一分钟倒计时，让我有足够的时间离开。一分钟后，报警器就装备好了。

8. 要有自我维持能力。报警器启动后，我不想让它轻易停止。如果有人打开了窗户，即便他又把窗户关上，报警器也应该继续发出警报声。或许晶体管能触发继电器，而当继电器接通时，它能保持在通电状态吗？或者晶体管可以做到？

9. 要有初始延迟。我不希望每次一走入受保护区域，报警器就立即开始报警。我想让它先等待一分钟，让我有时间走过去把它关掉。如果我在那段时间内没能关闭报警器，它就可以开始报警。

10. 要用密码关闭报警器。用某种密码键盘控制关闭报警器将非常理想。

实现愿望清单

愿望清单听起来有些雄心勃勃，因为你到现在为止仅仅搭建过一个电路，只是用三个晶体管组成了一个小振荡器。但是事实上，大多数功能都能用较容易的方法实现。我将把一些较难实现的功能留在后面的内容中，那时我们已建立了更广阔的知识基础。最终，我将能够解决愿望清单上的每一个问题，所有元件将安装在一块面包板上（噪音发生电路除外，它是可选择的）。

磁传感器开关

让我们从触发报警器的元件开始。典型的传感器开关由两个模块组成：磁性模块和开关模块。它们并排在图 3-75 中展示。

磁性模块只包含一块永久磁铁，而开关模块包含一个簧片开关，它在磁铁的作用下形成或断开连接（类似继电器内部的触点）。

把磁性模块连接到门窗的活动部分，把开关模块连接到窗框或门框上。当门窗闭合时，磁性模块几乎触碰到开关模块，磁铁使开关保持闭合，直到门窗开启时，开关才会断开。图 3-76 展示了磁铁-开关组合的截面图。

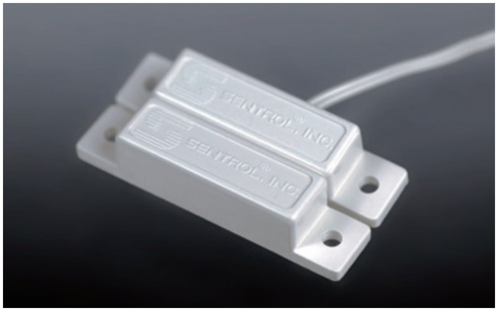


图 3-75　典型的报警传感器由塑料外壳包裹的磁铁（左下）和相似包装的磁性激励簧片开关（右上）组成

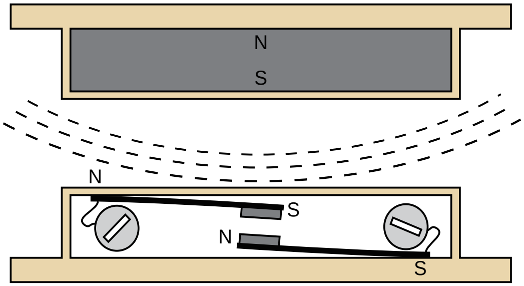


图 3-76　这张截面图展示了报警器系统中组成传感器的两个元件：簧片开关（底部）和激活开关的磁铁（顶部）

开关由两片弹性磁化金属片组成，终端形成电接触。每片金属片与一颗外部螺钉连接，螺钉可以连接导线。

当磁铁接近开关时，它会磁化弹性金属片，使金属片互相吸引，直到触点闭合。

从我的描述中你可以发现，簧片开关通常处于断开状态（Normally Open，NO），却受磁场影响保持闭合。如果你决定购买报警传感器，就应该知道，有些传感器包含工作方式不同的簧片开关。它们通常处于闭合状态（Normally Closed，NC），却受磁场影响而断开。它们不适合本实验。

“断路开启”晶体管电路

现在，我们如何开启报警器的噪音发生电路呢？记住，我们将设置多个串联的常闭型开关，当它们之中有任何一个断开时，报警器都必须触发。

回忆一下 NPN 型晶体管的工作原理。当基极电压较低时，晶体管阻碍集电极和射极之间的电流。当基极电压较高时，晶体管导通电流。

看一看图 3-77 中的电路图，它是用我们的老朋友——2N2222 NPN 型晶体管搭建而成的。出于测试需要，我用一个常闭型按钮开关代表了报警传感器。我知道你的备件中并没有常闭型按钮开关，但现在请你先运用想象力，直到我们准备好连接面包板电路为止。

只要按钮开关保持闭合，它就会通过 1 kΩ 的电阻器，把晶体管的基极和电源负极连接起来。

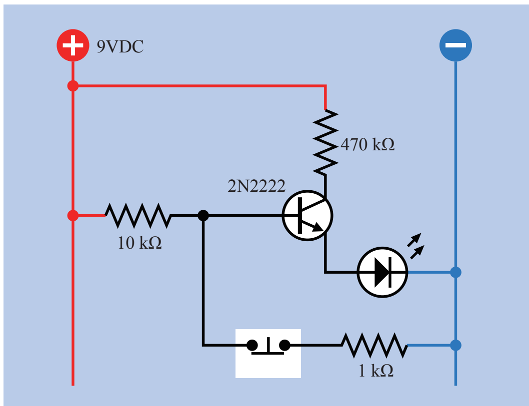


图 3-77　基本电路，当常闭型按钮开关断开时，LED 点亮

与此同时，晶体管基极也通过 10 kΩ 电阻器连接到电源正极。由于阻值的差异，晶体管基极电压更接近于 0 V 而非 9 V，使晶体管不能达到导通阈值。因此，晶体管只能通过很小的电流，LED 也没有足够的电压来点亮。

那么按钮开关断开后，又会发生什么呢？晶体管基极断开了与电源负极的连接，只与电源正极连接，它的电压显著升高，使晶体管内阻减小，通过更多的电流。现在，LED 点亮。因此，当按钮开关断开时，LED 就会点亮。

这个系统看起来切实可行。我们需要多个传感器，安在每扇门窗上，不过没问题——我们想串联多少都可以，如图 3-78 所示，每个按钮开关都可以用报警传感器代替。电路接线可以围绕整个房屋，因为导线的总阻值与 10 kΩ 电阻器相比较小。

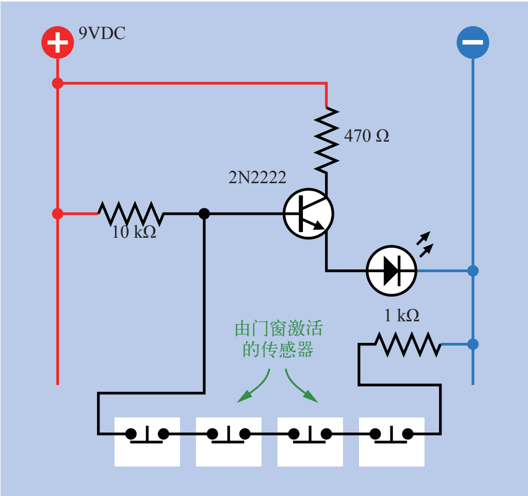


图 3-78　在串联传感器网络中，任何一个传感器都会破坏连续性，触发晶体管

当所有的传感器保持闭合时，晶体管通过的电流很小——大约为 1 mA。若用于开发和示范，你可以用 9 V 电池供电。若用于实际应用，你需要用使用自动充电系统的 12 V 报警器电池供电。这就超出了本书的范围，但是请记住，如果你需要报警器电池和充电器，它们很容易买到。

现在，假设我们拿下 LED，换上了一个继电器，如图 3-79 所示。（我用了一个双极继电器，虽然我们目前还用不到第二个极。）只要所有的按钮开关保持闭合，晶体管的基极电压就较低，因而晶体管不向继电器线圈提供电能，继电器触点保持在图中的位置上。

当任何一个传感器断开时，晶体管基极上的高电压都会使晶体管导通进入继电器线圈的电流，从而启动报警器，如图 3-80 所示。（此模式下使用继电器是可以的，因为继电器不会“一直断开”。它会保持常闭状态，只有在报警器被触发时才消耗能量。）注意，我从电路中除去了 470 Ω 的电阻器，因为继电器并不需要对电源进行防护。

你可以使用实验 7 中的同一个继电器自己搭建这个电路（请参考实验 7：研究继电器一节）。但是或许你应该等待我进一步的详细讲解。

你可能需要考虑以下几件事情。

- ❐ 继电器是否会使晶体管过载？你可以查阅这两种元件的数据表，找到答案。
- ❐ 记住，晶体管即使在导通时，两端也会有一个小压降。电压还足够激活一个 9 V 的继电器吗？继电器的数据表将告诉你，其线圈的最小工作电压是多少，你可以通过测试来证实。

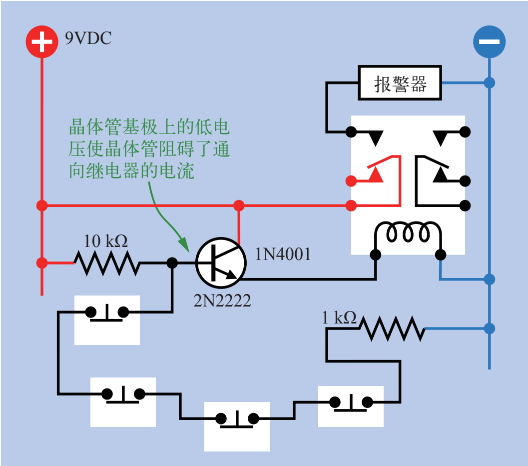


图 3-79　此电路中，传感器网络中的任何一个开关断开都会激励继电器

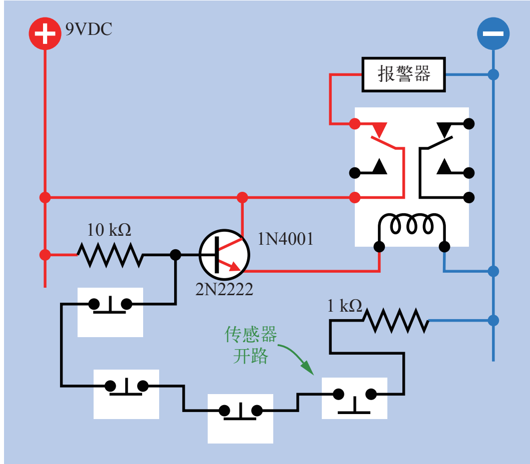


图 3-80　电路中的一个传感器断开，继电器被晶体管激活

自锁式继电器

目前搭建的电路可以在任何传感器开关断开时激活报警器。这一点很好，但是如果传感器开关回到了闭合状态，又会怎样呢？晶体管基极的电压重新变低，它关闭了报警器。这样可不好。

根据我愿望清单上的第 8 条，报警器应当能自我维持。即使有人打开门窗又迅速关上了，它也必须继续发出噪声。因此，继电器必须以某种方式形成自锁。

一种实现方法是使用自锁继电器，它保持一种状态（不是断开，就是闭合），只需提供电能就可转换到另一种状态。但是自锁继电器有两个线圈，当你想关闭警报器时，需要有另外的电路解锁存。实际上，使用非自锁式继电器更容易，我也能想出使继电器在接受了少量电能后，无限期保持导通的方法。

图 3-81 揭露了这个秘密。此视图中，最右侧的按钮开关在断开之后再次闭合，因此晶体管阻断，但继电器仍然导通，因为现在有一根导线把继电器的触点与自己的线圈连接在了一起。当继电器激活报警器时，它也将自身激活。

图 3-82 通过展示电流可能采取的路径阐明了这一概念。只要继电器的触点闭合，它的线圈就会通过自己的触点通电。以这种方式，继电器能够保持导通状态。

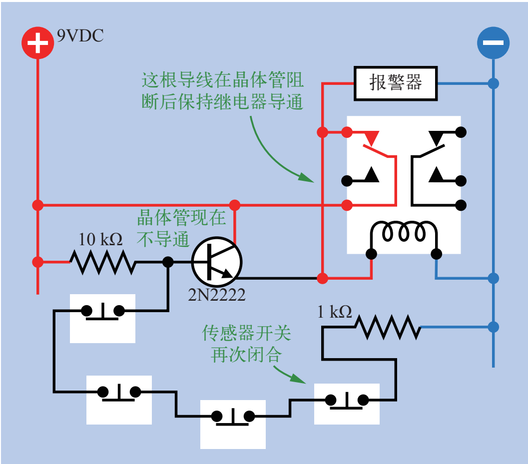


图 3-81　传感器开关再次闭合。晶体管不再导通，但报警器锁定

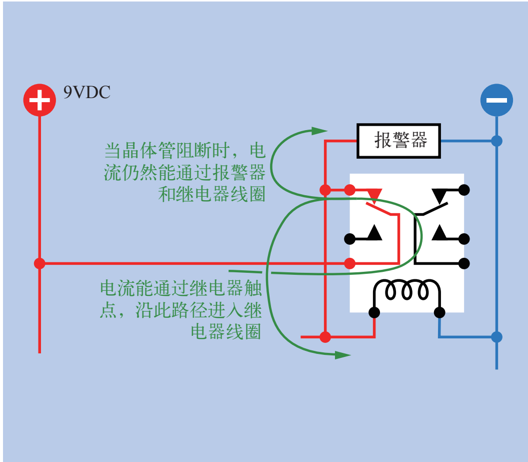


图 3-82　图 3–81 的特写，展示了继电器是如何保持导通状态的

阻断坏电压

这个设计看来很有希望，但也存在问题。图 3-81 中的电路图并不完全准确。看一看图 3-83，图的上半部分是电路相关部分的另一幅特写。当报警器锁定在开启状态，而晶体管阻断时，电流就会从继电器线圈流回到晶体管射极。我本应把这段导线画成红色的，因为它的电压相对较高。

在晶体管两端施加反向电压是错误的做法，可能会损坏晶体管。应该怎样处理这个问题呢？或许我可以用某个器件阻断反向电流：一个整流二极管。图 3-83 的下半部分画出了二极管。

图 3-84 展示了更新的完整电路图，包括了二极管。

但是二极管到底是什么？它和发光二极管（LED）一样吗？它们既相同，又不同。

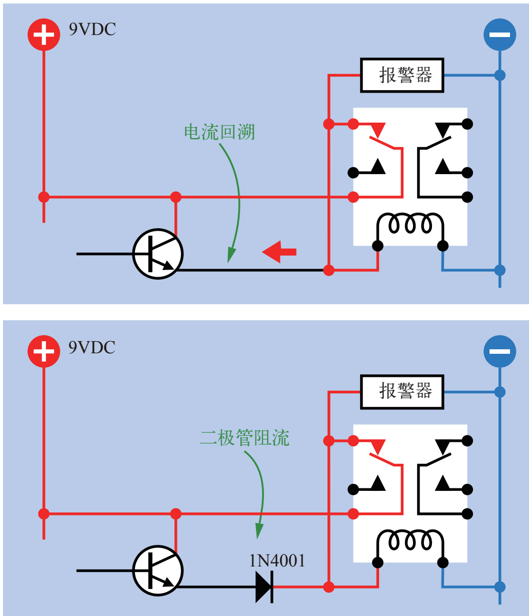


图 3-83　可以添加一个二极管，当报警器锁定、晶体管阻断时，二极管能防止电流反向流入晶体管

基础知识：二极管

二极管是一种早期的半导体元件。它允许电流沿一个方向流动，但阻碍反方向的电流。二极管与它后来的表亲 LED 相似，会因为电压反转、功率过大而损坏，但是大多数二极管的耐受力普遍优于 LED。实际上，二极管是用来阻断反向电压的，所能承受的反向电压限度由生产商规定。

二极管阻止正向电压的一极通常带有标记，一般用圆形色带表示，如图 3-25 所示。带标记的一极叫做**阴极**，另一端是**阳极**，不带标记。二极管有时用于逻辑电路，也可以把交流转化为直流。如果二极管无法承受你想让它阻碍的电流，那么就换一个更大的二极管。二极管有多种尺寸。

建议使用额定功率大于电路实际功率的二极管。和任何半导体元件一样，如果二极管的使用不正确，也会发生过热、烧毁。

二极管的符号看起来像 LED 的中心部分，去掉了圆圈和箭头。图 3-85 展示了三种表示方法。

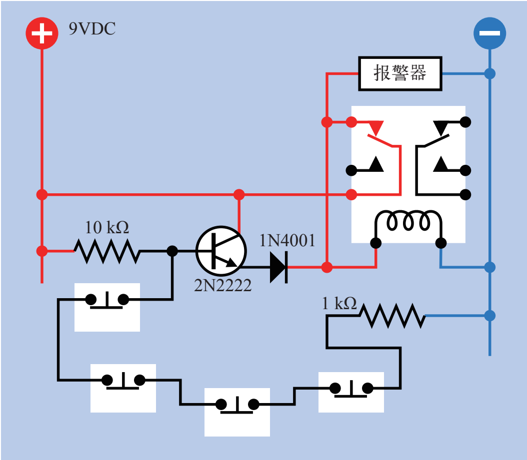


图 3-84　完整的电路，包括二极管

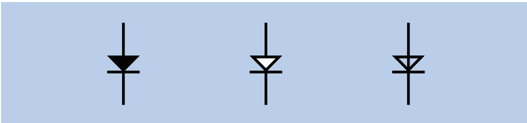


图 3-85　三种表示二极管的电路图符号，它们的功能都相同

问题的连环产生

先前，我需要使继电器保持导通的问题。通过外加导线，我解决了这个问题，但是导线又造成了新的问题：电流会反向流入晶体管。我又添加了一个二极管来解决这个问题，但是依然产生了新的问题。

我们要为二极管提供的服务支付一定的报酬，正如我们要为晶体管的服务支付一定的报酬。实际上，因为这两种元件都是半导体，所以报酬也十分相似，都体现为电压的减少。

继电器断开后，电流必须通过晶体管和二极管使继电器导通。继电器导通后，它的状态就锁定了，这并不是什么问题。但是晶体管两端要有约 0.7 V 的压降，而二极管两端也要有约 0.7 V 的压降，一共 1.4 V。它们的压降是固定的，无论电源电压是多少。

我认为额定电压为 9 V 的继电器可以在 7.6 V 的电压下正常工作。我的 Omron 数据表写明，我推荐使用的 G5V-2 系列继电器只需额定电压的 75%（即 6.75 V）即可正常工作。这个误差幅度貌似比较合理。

但是如果用不同的继电器替换呢？有些继电器的性能要求更为严格。如果用电池给电路供电，它的电压下降到 9 V 以下又该怎么办？设计者应该预见意料之外的情况，而一般情况下，应当尽可能使元件接近它们的额定值。

在本书第 1 版刊出本实验的电路后，有几位读者来信询问了压降的问题。（我确实很注意读者反馈。）当时，我规定使用 12 V 直流电源，感觉晶体管和二极管的 1.4 V 压降还可以接受。但是在第 2 版中，我决定所有的实验采用 9 V 直流电源，这样如果你更喜欢电池，就不用买交流适配器了，用电池就可以。遗憾的是，从 9 V 扣除 1.4 V 难以接受。

你现在明白了，决策是导致后果。由于我使用的是 9 V 直流电源，所以我要想出更好的方法让继电器形成自锁。

解决问题

解决问题的第一步是弄清楚发生了什么问题。

报警器的控制任务由两个元件承担：晶体管和继电器。晶体管开启报警器，之后就阻断电流，无事可做了，而继电器的任务就是保持自身锁定。该系统的弱点是，当一个任务由两个元件承担时，它们会互相干扰。更好的计划应该是让一个元件控制其他所有元件。我应该保持晶体管的控制作用，它应当保持自身导通，而只要它处于导通状态，继电器也将保持导通。

啊，现在我知道如何修改电路了。我只需用到继电器（即实验 7 中你使用过的继电器）的第二个极。我可以让第二个极的触点（通常为闭合状态）将串联传感器接地，如图 3-86 所示。

以下是电路的工作原理。

晶体管的基极现在通过所有的传感器、1 kΩ 电阻器和继电器右侧的触点（通常闭合）连接到电源负极。只要这一系列连接不中断，晶体管的基极电压就足够低，能够阻止电流通过。

现在有人断开了一个传感器开关，于是晶体管基极不再接地，晶体管因而激活了继电器。继电器闭合左侧的触点，启动报警器，但是继电器也断开了右侧的触点。

现在如果有人再次闭合传感器开关就无关紧要了，因为继电器右侧的触点断开，并切断了与电源负极之间的连接。晶体管继续导通电流，而继电器保持激活，如图 3-87 所示。

这样问题就解决了。

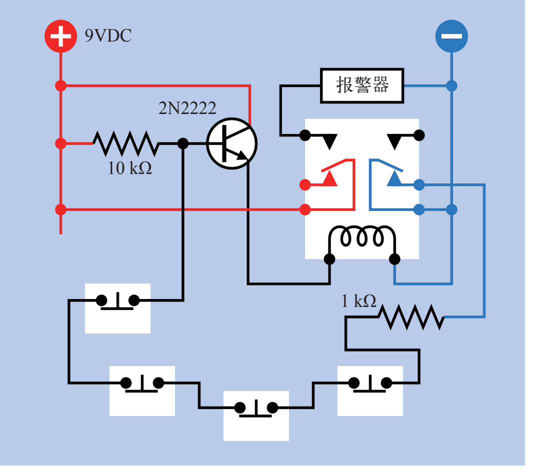


图 3-86　串联传感器现在通过继电器右侧的触点接地，这对触点通常闭合

保护二极管

在图 3-87 中，我删去了电路中的二极管。但是如果你看一看图 3-88（我保证它是最后一个版本，至少现在是），就会发现二极管又回来了，但是它现在的作用迥然不同。它现在与继电器线圈并联。它到底在干什么呢？

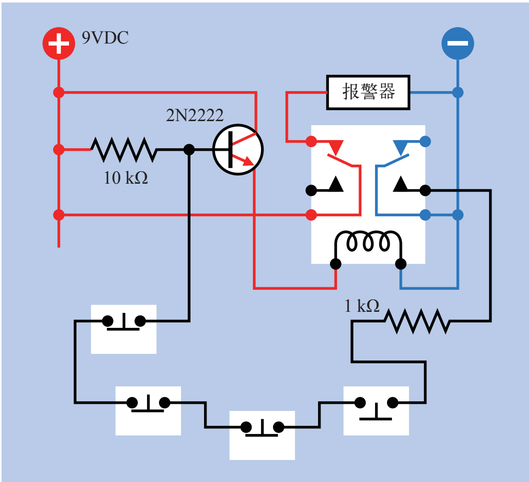


图 3-87　由于已经断开了一个传感器开关，晶体管会一直保持导通，即使传感器开关随即又闭合

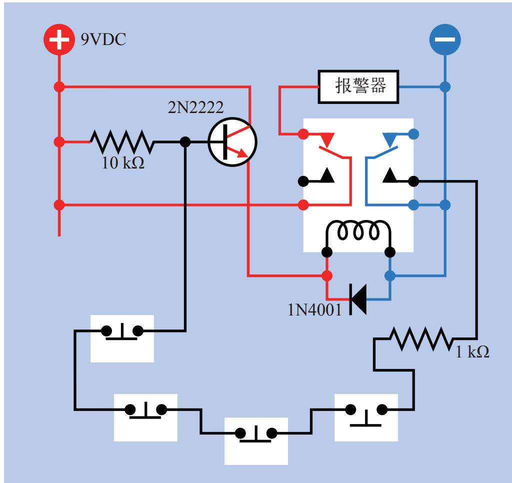


图 3-88　二极管回来了，它现在的作用是保护电路

在本书后面的内容中，我将介绍关于线圈的知识。现在我可以告诉你，在接通电源后，线圈储存电能，而切断电源后，线圈释放电能。电能的释放会产生浪涌电流，可能会损害某些元件，尤其是半导体。

因此，标准流程是在继电器线圈两端并联一个保护二极管。二极管采取了图中的连接方向，以阻碍电流的正常流通，强迫其流入继电器线圈，而这正是我们想要的。但是当电流消失，线圈试图释放电能时，二极管却拦在中间，对继电器说：“我在那个方向上的阻值很小，为什么不把电流分流到我这里，而要让它去打扰其他元件呢？”

以上就是所发生的一切。

如果你使用的只是一个很小的继电器，它的线圈很小，不会产生太大的电流，你也可以不并联保护二极管。但是，使用保护二极管是良好的习惯，你应该努力养成这一习惯。

连接面包板

本实验中，我作了很多解释，这并不符合我的一贯风格，但是我必须阐明电路是如何从零开始

设计的。现在，到了最后的阶段，你要搭建电路了——否则你又怎能知道电路能否正常工作呢？

图 3-89 展示了一种面包板布局。我没有使用报警器的噪音发生器，而是用 LED 代替，以作解释说明。我很快就将讨论噪音发生器的选择。

图 3-90 展示了面包板电路的透视视图。

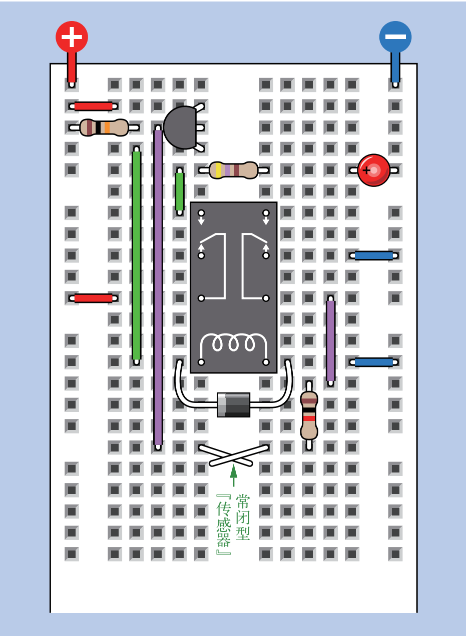


图 3-89　面包板报警器电路，最终版本

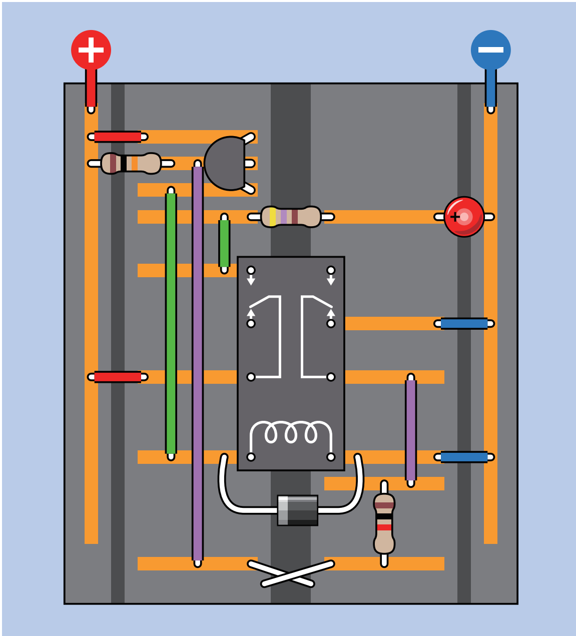


图 3-90　面包板报警器电路的透视视图

为了模仿面包板上的报警传感器，我本应使用常闭型按钮开关的，但是我想尽可能地减少元件成本，而且如果你确实想使用这个报警器电路，你会用到磁传感器开关，而不是按钮开关。因此，作为替代，我使用了两根常闭型导线。它们对于测试已然足够，我要称它们为“传感器导线”。你将看到它们在继电器下方相互交叉。

要确保电源接通时导线互相接触。起初，什么都不会发生。

现在断开传感器导线。LED 点亮，如果你完成了本电路的第二个版本，噪音发生器会响起，表明报警器已经触发。

现在重新连接传感器导线，模仿这样一种情况：入侵者打开一扇窗户，听到警报声，又迅速关上了窗户。如果你的电路连接正确，LED 就会一直亮下去。

到目前为止一切顺利，我们得到了一个功能电路，报警器能够自我锁定。

但是这种情况下，你怎样才能让电路停止呢？

没问题，断开电源就好。继电器会回到默认位置，等你下一次接通电源时，它又在待命模式上了。在最终版的电路中，你将需要在键盘上输入密码才能关闭报警器。在实验 21 中，我将介绍一种搭建密码保护电路的方法，届时你将使用逻辑芯片，只是目前还没有涉及。

加入声音

报警声可以使用实验 11 中的振荡器电路和扬声器发生，但是确实还有更好的方法。一种叫作 555 定时器的小型集成电路芯片更适合完成这项任务，而且它恰好是我要在下一个实验——实验 16 中介绍的元件。

555 定时器也可以满足我愿望清单上的第 7 条和第 9 条，它们要求报警器在启动之前有一定的延迟。因此，我将暂时搁置报警器项目，我们会在实验 18 中完成它。

参考：实用信息

虽然报警器项目还没有结束，但是它提出了几个重要的问题。我将在此处作出总结，以供未来参考。

- ❒ 你可以使用晶体管为低输入提供高输出响应，反之亦然。
- ❒ 你可以对继电器进行接线，使它形成自锁导通模式，只需把电流反馈回继电器的线圈。
- ❒ 二极管可以阻碍电流，防止电流流向你不希望的地方。
- ❒ 正向电流通过二极管时，电压降低约 0.7 V。
- ❒ 晶体管也形成约 0.7 V 的压降。
- ❒ 无论电源电压是多少，半导体元件形成的压降都保持不变。因此，在电源电压较低时，压降的效果更加显著。
- ❒ 在电源切断时，继电器线圈会形成反电动势（一股反向电流）。
- ❒ 与继电器线圈并联的保护二极管可以抑制反电动势。二极管采取的连接方向应当使其阻碍正常流通的电流，却导通线圈产生的反向电流。

4

第 4 章

芯片，你好!

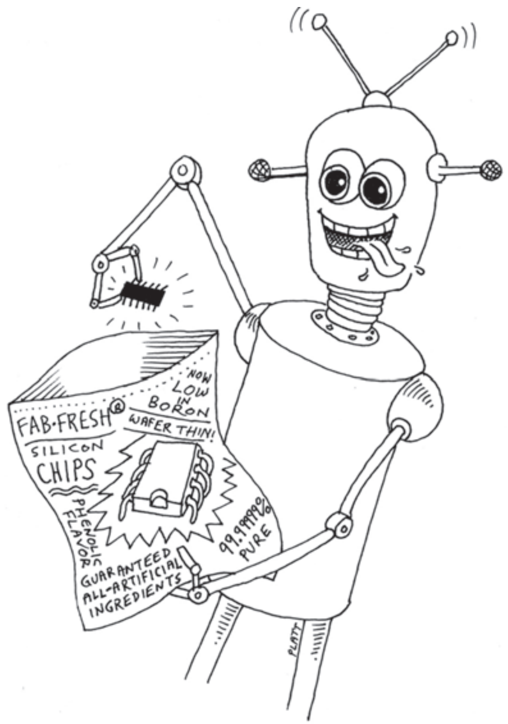


图 4-1　我的角色模型

在开始讲解集成电路芯片（通常称为 IC 或芯片）这个有趣的主题之前，我需要做一番忏悔。如果让芯片来完成的话，我让你在前面的实验中进行的一些操作本来可以容易一些的。

但这就意味着你浪费时间了吗？当然不是！我坚信，通过使用晶体管、二极管等单个元件搭建电路，你会对电子学原理有最深刻的理解。然而，那些包含数十个、上百个或者上千个晶体管结的芯片也能够造成短路。

你可能还会发现，芯片玩起来怎么就那么容易上瘾呢？尽管你可能不会像图 4-1 中的这个家伙一样兴奋。

除前文介绍的器材之外，下文描述的工具、设备、元件和配件将在实验 16 至实验 24 中用到。

购物清单

与芯片配合使用的唯一新工具就是逻辑探针了。它能告诉你芯片的单个引脚电压是高还是低，有助你理解电路的功能。探针具有记忆功能，它会点亮自己的 LED 并保持发光，作为对脉冲的响应。脉冲速度可能太快，肉眼难以察觉。

有些读者不同意我的观点，但是我把逻辑探针作为可选工具，而非必要工具。上网搜索一下，购买最便宜的探针就可以了，我没有特定的推荐品牌。

购买元件

如前，如果想买元件和配件套装，请参考第 6 章的套装一节。如果你喜欢从在线商店自己购买元件和配件，请参考元件一节。若想购买配耗材，请参考耗材一节。

基础知识：选择芯片

图 4-2 展示了两个集成电路芯片。上方的芯片是老式的通孔类型，它的引脚间距为 1/10 英寸，这样就能插在面包板或多孔板的小洞中了。我将只使用这种芯片，因为它们容易操作。较小的芯片是表面安装类型，我不会使用它们，因为它们不适合面包板或多孔板，操作起来也不容易。

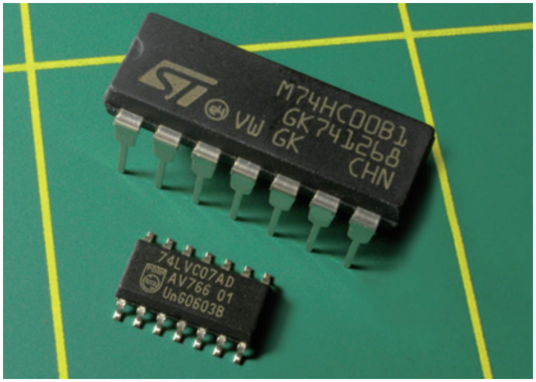


图 4-2　通孔芯片（上方）和表面安装芯片（下方）

很多通孔芯片和表面安装芯片的功能完全相同，唯一的区别就是尺寸（但是一些表面安装芯片的工作电压较低）。

芯片的主体通常由塑料或树脂制成，称为封装。传统的芯片通常做成双列直插式封装（Dual Inline Package，DIP），即有两排（双列）引脚。用塑料制成，则缩写为 PDIP。

表面安装封装通常可以根据 S 开头的首字母缩写识别，例如，小外形集成电路（Small Outline Integrated Circuit，SOIC）。表面安装芯片的种类繁多，引脚间距和其他规格各不相同。这些内容超出了本书的范围，如果你要自己购买元件，一定要谨慎，不要选择错误。

芯片内部，电路蚀刻在一片很薄的硅晶片上，这就是“芯片”这一术语的由来，尽管现在“芯片”一词指代的是整个元件，但我在此将延续这个传统。封装内部的细导线把电路和芯片两侧伸出的引脚连接起来。

图 4-2 所示的 PDIP 芯片每行有 7 根引脚，总共 14 根。其他芯片的引脚可能有 4 根、6 根、8 根、16 根或更多。

几乎每个芯片上都印有部件编号。注意，虽然图 4-2 中的两个芯片看起来大不相同，但是它们的部件编号中都有“74”。这是因为它们在几十年前刚问世时，都属于编号为 7400 及以后的逻辑芯片家族。这个家族通常称为 74*xx* 芯片族，我将大量用到这些芯片。

看看图 4-3，大写字母表示生产商，可以忽略它，因为它不会影响我们要做的事。[为什么 SN 代表德州仪器？这是因为该公司最初把自己的芯片称为 semiconductor networks（半导体网络）]。

跳过这些字母，直到你遇见“74”。之后你会看见两个重要的字母。7400 芯片族经过了多代发

展，“74”后面的字母表明你使用的是哪一代芯片，包括：74L、74LS、74C、74HC 和 74AHC，还有很多很多。

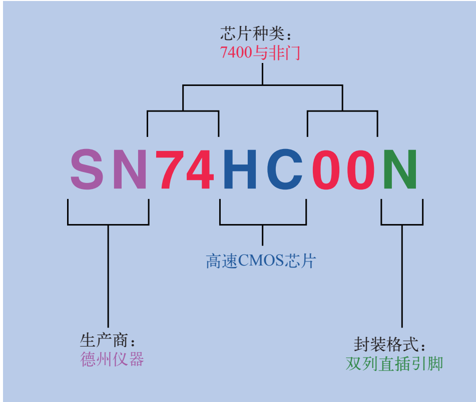


图 4-3 如何解读 74*xx* 芯片族芯片的部件编码

总体来说，新芯片比老芯片速度更快，通用性也更好。在本书中，我只使用 7400 芯片族的 HC 代芯片，因为这一代芯片几乎包括了所有 7400 族的芯片，成本适度，芯片耗费的功率也不大。对我们的目的而言，新芯片提供的更高速度作用并不大，但是如果你喜欢，当然也可以使用 HCT 代芯片。

在表明芯片世代的字母后面，你会看见一串数字，可能是 2 个、3 个、4 个或 5 个。它们表明芯片的特殊功能。这串数字后面是另外一个或者两个字母，对我们的目的而言，这些结尾字母并不重要。

回顾一下图 4-2，DIP 芯片的部件编号告诉你，它由意法半导体公司（STMicroelectronics）生产，属于 74*xx* 芯片族，HC 代，功能由数字 00 表示。

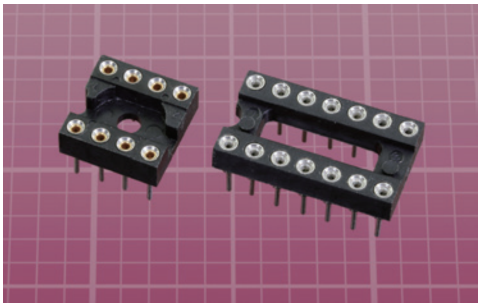
这一段讲解的目的是帮助你在购买芯片时解读目录清单。你可以搜索“74HC00”，在线供应商的搜索引擎通常能显示多家生产商提供的合适芯片，尽管搜索结果中，搜索词的前后会增加几个字母。

你只需确定芯片适合在面包板上使用。把搜索结果限定为 DIP、PDIP 或通孔封装类型。如果部件编号以 SS、SO 或 TSS 开头，它一定是表面安装芯片，不要购买。要获取关于搜索和购买的更多信息，请参考第 6 章网上搜索和购买一节。

本章实验所需的所有芯片类型都已在图 6-7 中列举出来。你还需要其他的几种元件，我将在下面列出。

可选工具：芯片插座

如果你计划用焊料永久固定电路，那么我不建议直接焊接芯片，因为如果不慎连错电路或损坏芯片，就不得不给多个引脚拆焊，才能取下芯片。这非常困难。为了避免这个问题，你可以买一些 DIP 插座，把它们焊在电路板上，然后把芯片插在插座上。你可以使用最便宜的插座（我们并不需要镀金的触点）。你要用到 8 引脚、14 引脚和 16 引脚的插座，每种最少 5 个。图 4-4 展示了两种插座。


图 4-4 为避免直接焊接对芯片造成的损害，可以先把芯片插座焊接在电路板上，然后插入芯片

必要工具：超小型滑动开关

滑动开关上有一个小控制杆，你用手指前后推动它，就在开关内部形成或断开了电学连接，如图 4-5 所示。它有三根引脚，间隔 0.1 英寸。如果你要自己购买元件，请参考第 6 章其他元件一节，找到第 4 章的购物清单，获取关于开关的更多信息。

注意：开关过载

非常小的滑动开关不适合开关大电流或大电压，它是为低功率电路设计的，最高承受限度可能只有直流 100 mA，12 V。这对于我们的目的已经足够。如果你希望滑动开关具有更多的功能，请查阅生产商的数据表。

必要工具：小电流 LED

HC 系列的逻辑芯片输出的电流不能大大超出 5 mA。你可以让它们输出 20 mA 的电流以点亮 LED，但这样做就会拉低输出电压，使它不再适合作为其他逻辑芯片的输入。建议你在进行逻辑芯片实验时使用小电流 LED。

请记住，小电流 LED 需要更高阻值的串联电阻器，因为它们能承受的电流不如通用 LED 大。我将在必要的地方重申这一点。

必要工具：数字显示器

有一个芯片实验将通过七段数字显示器（数字时钟和微波炉上仍能见到的简单显示器）显示输出，如图 4-6 所示。若要获取购买信息，请参考第 6 章其他元件一节，查找第 4 章的购物清单。

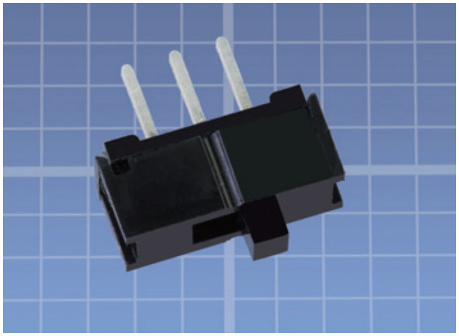


图 4-5　本书推荐使用的超小型滑动开关

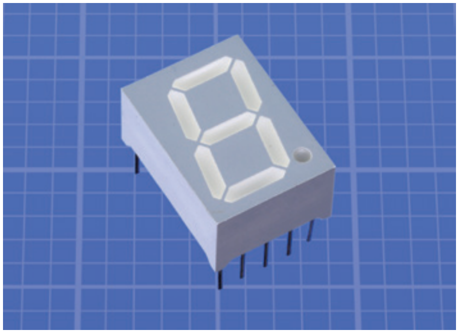


图 4-6　七段数字显示器是最便宜的数字显示工具，可以由某些 CMOS 芯片直接驱动

必要工具：稳压器

因为很多逻辑芯片都要求精确的 5 V 直流供电，所以你需要用稳压器保证稳定的电压供给。LM7805 稳压器可以满足要求。芯片编号的前后是字母缩写，表明生产商和封装样式，例如仙童半导体公司生产的 LM7805CT 芯片。生产商并无讲究，但是稳压器应该和图 4-7 中的样式相似（称为 TO220 封装样式）。任何逻辑电路都要用到稳压器，所以建议购买五个。

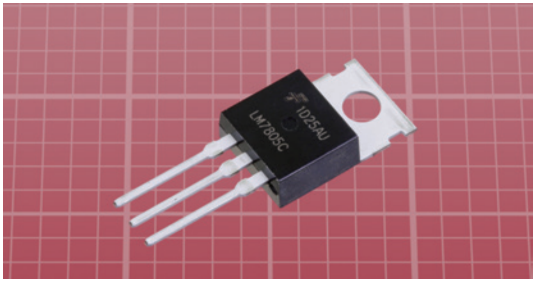


图 4-7　很多集成电路芯片都要求把电源电压控制在 5 V，图中的稳压器可以把 7.5 V~12 V 的电源电压调节为 5 V

其他可选工具

为了完成实验 18 中的报警器系统，你将用到可以安装在门窗上的磁传感器，例如 8601 型磁传感器，可以从数十家在线商店买到。

如果想把面包板上的电路移动到永久性外壳内，那么你一直使用的触摸开关就不够结实，也不易操作。在实验 18 中，你将用到大型的双极双掷按钮开关，类型为 ON-(ON)，带有焊接引脚。如果你在 eBay 上搜索“双极双掷按钮开关”，将会有很多种选择。

背景知识：芯片的发明

把固态元件整合到一个小封装内的概念是英国雷达科学家杰弗里·杜莫（Geoffrey W. A. Dummer）提出的，他提出这个概念数年后才于 1956 年尝试实验，可惜失败了。第一个真正的集成电路直到 1958 年才由德州仪器公司的杰克·基尔比（Jack Kilby）制造出来。基尔比的芯片使用了锗，因为锗当时已经被用作半导体。（实验 31 讲到晶体收音机时，你会遇到锗二极管。）但是罗伯特·诺伊斯（Robert Noyce，见图 4-8）有更好的主意。



图 4-8　罗伯特·诺伊斯，集成电路芯片专利的持有者，英特尔公司创始人之一

诺伊斯，1927 年出生在爱荷华州，他于 20 世纪 50 年代搬到了加利福尼亚州，为威廉·肖克利（William Shockley）打工。当时，肖克利的晶

体管企业刚刚建立，晶体管是他在贝尔实验室与别人合作发明的。

有八名员工对肖克利的管理十分不满，他们离开了肖克利，创建了仙童半导体公司，诺伊斯就是其中一位。诺伊斯担任公司总经理时，他发明了硅基集成电路，避免了与锗基相关的生产难题。人们都称赞他使集成电路成为可能。

早期的集成电路用于军事应用，因为“民兵”式导弹的制导系统需要小巧、轻便的元件。军事应用几乎消耗了 1960~1963 年生产的所有芯片，在这段时间内，按 1963 年的价格计算，每个芯片的价格从约 1000 美元降到了 25 美元。

20 世纪 60 年代末，MSI（Medium Scale Integration，中等规模集成）芯片出现了，每个芯片包含数百个晶体管。70 年代中期出现的 LSI（Large Scale Integration，大规模集成）芯片每个包含数万个晶体管，而今天的计算机芯片可以包含数十亿个晶体管。

罗伯特 • 诺伊斯最终与戈登 • 摩尔（Gordon Moore）一起创立了英特尔公司，却不幸于 1990 年突发心脏病逝世。你可以在硅谷历史协会的网站上（http://www.siliconvalleyhistorical.org）学到更多关于芯片设计、制造的迷人早期历史。

实验 16：产生脉冲

我将介绍制造得最成功的芯片——555 定时器，以此开始我们的芯片实验。你可以在网上找到无数的使用指南，但是我为什么要在此讨论它呢？我有以下三个理由。

它必不可少。你一定要了解这种芯片。有些资料估计，555 定时器每年仍要生产十亿多个。它将以不同方式应用在本书剩下的大部分电路中。

它非常实用。555 定时器可能是最通用的芯片，它的应用方式无穷无尽。它的输出电流较大（最大额定输出 200 mA），非常有用，而且芯片自身也不易损坏。

它遭人误解。从早期西格尼蒂克公司的数据表开始，我阅读了十几篇指南，又读了电子爱好者写的各种材料，得出的结论是：很少有人在入门阶段阐述芯片内部的工作原理。我想让你形象地理解芯片内部发生的一切，没有打好基础，你很难创造性地使用芯片。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 电阻器：470 Ω 1 个、10 kΩ 3 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 1 个、15 μF 1 个
- ❒ 微调电位器：20 kΩ 或 25 kΩ 1 个、500 kΩ 1 个

- ❒ 555 定时器芯片 1 枚
- ❒ 触摸开关 2 个
- ❒ 通用 LED 1 个

了解芯片

555 芯片的引脚按逆时针顺序编号（从上方看），如图 4-9 所示。芯片的封装上有一个凹痕或者浅窝，或者两者都有，位于封装的顶端。引脚间距为 1/10 英寸。

其他的所有通孔芯片规格都相同，只是引脚数量可能更多。通常（但不一定），两排引脚之间的水平距离为 3/10 英寸，意味着芯片可以跨在面包板中间的通道上，而面包板内部的导线能够连接到芯片的每个引脚上。是的，这就是面包板如此布局的原因。

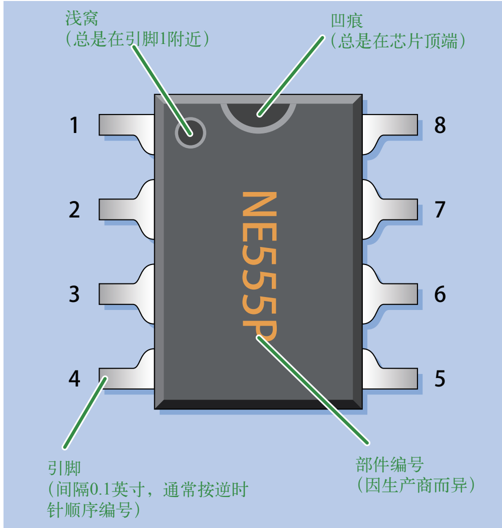


图 4-9　八引脚芯片的封装设计。虽然几乎所有的芯片顶端都有一个半圆形的凹痕，但是有的芯片在引脚 1 旁边没有浅窝

单稳态测试

555 定时器上的引脚也有名称，如图 4-10 所示。此图标明了芯片的引脚分配。我将解释每个引脚的功能——但是像往常一样，我希望你能自己进行一番初步研究。

图 4-11 展示了定时器的测试电路图。

你可以按照图 4-12 所示，在面包板上搭建电路。注意，左下角附近有一根很短的红色跨接线，连接了正极总线的上下两部分。设置这根跨接线的目的是应对面包板总线中间有中断的情况。

图 4-13 展示了各元件的值。为了帮助你想象连接，图 4-14 展示了电路的透视图。

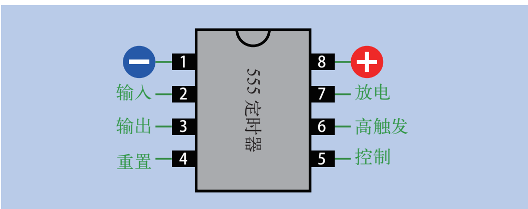


图 4-10　555 定时器芯片的引脚分配

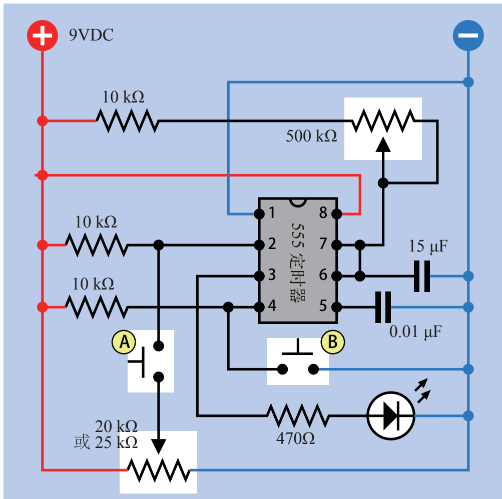


图 4-11　帮助你研究 555 定时器芯片的电路

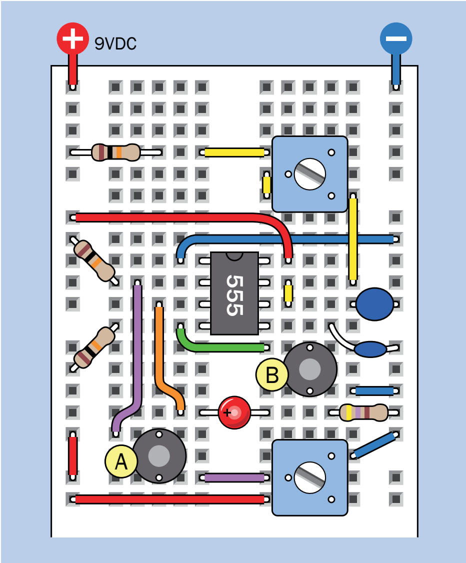


图 4-12　在面包板上搭建的 555 定时器芯片测试电路

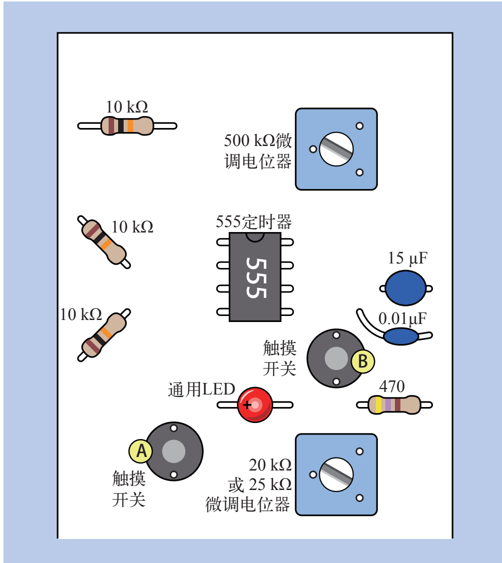


图 4-13　555 定时器芯片测试电路各元件的值

接通电源，什么也没有发生。定时器正在等待触发。转动 500 kΩ 微调电位器到一半的阻值，设置定时器。

现在，把 20 kΩ 的微调电位器逆时针转到头，按下按钮 A。如果仍然什么都没有发生，就再把电位器顺时针转到头，再试一遍。总有一种方法会在 LED 上激发一个脉冲，这取决于你在面包板上安装电位器的方式。如果还是得不到脉冲，就说明你的电路出了错误。

查看电路图，你会发现定时器的 2 号引脚（触发引脚）通过 10 kΩ 电阻器与电源的正极连通。但是也有一根紫色的导线与触发引脚连接，通过触摸开关连接到电位器上。如果电位器转动，使滑动片直接连接到电源的接地负极，就会使触摸开关压制住 10 kΩ 电阻器，向 2 号引脚施加低电压，于是触发了定时器。

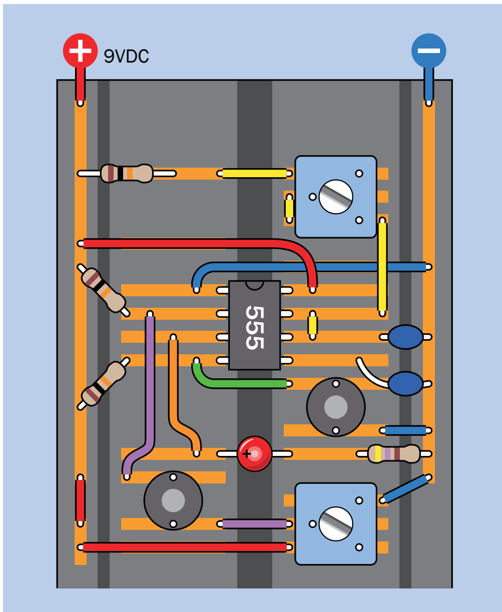


图 4-14　定时器芯片测试电路的内部连接

如果 20 kΩ 的微调电位器沿反方向转到头，按钮 A 将直接向 2 号引脚施加高电压，而且由于 2 号引脚已经通过 10 kΩ 电阻器获得了高电压，因此通过按钮 A 外加的高电压没有影响。

❒ 触发引脚上的高电压被芯片忽略。

❒ 触发引脚上的电压下降会触发定时器。

但是，多大的电压是高电压，多大的压降才足够作为触发呢？让我们一起来探究。

拿出万用表，将它设置为测量直流电压，调整 20 kΩ 微调电位器至不同的阻值，按下按钮 A，同时测量 2 号引脚和接地负极之间的电压。我打赌，当你按下按钮，向 2 号引脚输入 3 V 以下的电压时，定时器会使 LED 闪烁。输入 3 V 以上的电压时，我看不会发生什么。

❒ 定时器由触发引脚上的电压触发，该电压小于电源电压的三分之一。

❒ 松开按钮，LED 会继续发光。

❒ 你可以将任意按钮按下任意长时间（小于定时器的周期），LED 将重复发出同样时长的脉冲。

图 4-15 用波形展示了定时器的响应。定时器将参差不齐的波形转换成了精确可靠的输出。它并非完美地瞬时开关，但是它的速度很快，看起来已然是瞬时的。

现在，把 500 kΩ 微调电位器调整到不同的位置，触发定时器。你会发现脉冲的长度因而得到调整。

❒ 7 号引脚和电源正极之间的电阻大小决定了定时器发出脉冲的长度（与 6 号引脚上的电容器也是决定性因素）。

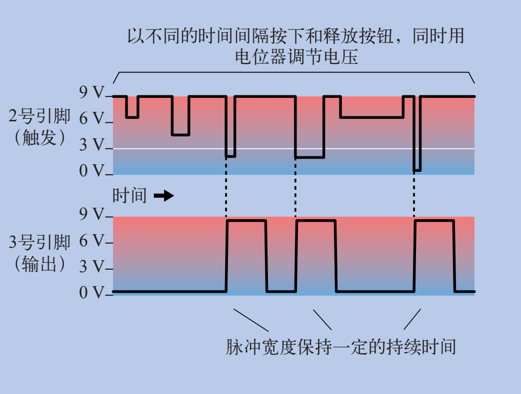


图 4-15　555 定时器如何对触发引脚上不同的持续时间和电压进行响应

下面是另一次尝试。设置 500 kΩ 微调电位器，产生一个长脉冲。按下按钮 A，然后迅速按下按钮 B，按钮 B 将在脉冲结束前使它终止。按住按钮 B，同时试着用按钮 A 再次触发定时器，什么也没有发生。

❒ 4 号引脚是重置引脚。把它接地就会强迫定时器中断正在进行的任何操作，直到断开 4 号引脚与地的连接以后，定时器才恢复功能。

最后，松开按钮 B，按住按钮 A 一直不动。这样就延长了定时器的脉冲宽度，直到松开按钮 A。

❒ 保持定时器触发引脚上的低电压会无限期地再触发定时器。

连接到 2 号和 4 号引脚上的 10 kΩ 电阻器称为上拉电阻器，因为它们保持了引脚上的高电压。如果引脚更直接地连接到接地负极，就会压制上拉电阻器，变为低电压。

上拉电阻器的概念在使用芯片时很重要，因为你一定不能让输入引脚保持未连接状态。未连接的引脚处于悬空状态，可能会引发问题，因为它会受到杂散电磁场的影响，我们无法得知引脚上每时每刻的电压是多少。

有没有下拉电阻器呢？当然有。但是 555 定时器需要的是上拉电阻器，因为 2 号或 4 号引脚由高电压保持正常状态，而由低电压触发。

❒ 555 定时器分别通过 2 号和 4 号引脚上的低电压触发或重置。

脉冲定时

研究一下图 4-11 中的电路图，你就会发现，正电流通过 10 kΩ 电阻器和 500 kΩ 微调电位器到达 7 号引脚（放电引脚）。（连接了 10 kΩ 电阻器的原因是，7 号引脚不应直接连接到电源正极。）

你还会发现，电流在通过 500 kΩ 微调电位器后，遇到了一个 15 μF 的电容器。电阻器连着电容器——看起来像不像 *RC* 网络？定时器是不是利用了电阻–电容组合来决定输出脉冲的长度？

确实如此。在定时器芯片内部，一些灵敏的器件感知 15 μF 电容器上的电压，定时器利用这个电压终止输出脉冲。

你可以自己测量这个电压。设置 500 kΩ 微调电位器，产生一个长脉冲，用万用表测量电容器左侧的电压。你会观察到电压不断上升，一直达到 6 V。定时器以这个电压为停止输出脉冲的信号，然后电压迅速下降，因为定时器在内部将电容器接地了。这就是 7 号引脚称为放电引脚的原因：定时器通过该引脚给电容器放电。

❒ 当定时电容器上的电压达到电源电压的 2/3 时，定时器终止输出脉冲。

但是为什么把放电引脚和高触发引脚放在一起呢？你将在下一个实验中学习到。我们将重新连接定时器，让它输出一系列脉冲，而不只是一个脉冲，此时定时器将在非稳态模式下运行。现在，你正在单稳态模式下使用它。

❒ 在单稳态模式下，对于触发事件，定时器只输出一个脉冲作为响应。

❒ 在非稳态模式下，定时器输出连续的一串脉冲。

最后，你可能想知道 0.01 μF 的电容器为何要连接到 5 号引脚上。5 号引脚是“控制”引脚，意味着给它加上电压，就能控制定时器的灵敏度。因为我们还用不到这个功能，所以最好给 5 号引脚连接一个电容器，保护它免受电压波动影响，防止芯片的正常功能受到干扰。

注意：小心引脚顺序改变！

在本书的所有电路图中，芯片都会按照面包板上的实际样式给出，引脚遵照数字顺序编号。

你可能会发现其他书籍或网站上的电路图不太相同。为了使电路图画起来更方便，人们常常给引脚重新排序，而且也不会把电路画成面包板的布局，两边各有一条正负极总线。图 4-16 就是一个

例子，图中的电路与图 4-11 完全相同，但是调整了引脚顺序，以简化连接，减少线路交叉。

引脚顺序的改变可以使电路在某种程度上更容易理解（尤其是电源正极在电路顶端，接地在底部的时候），但是你一般需要用笔和纸转换一下布局才能在面包板上搭建电路。

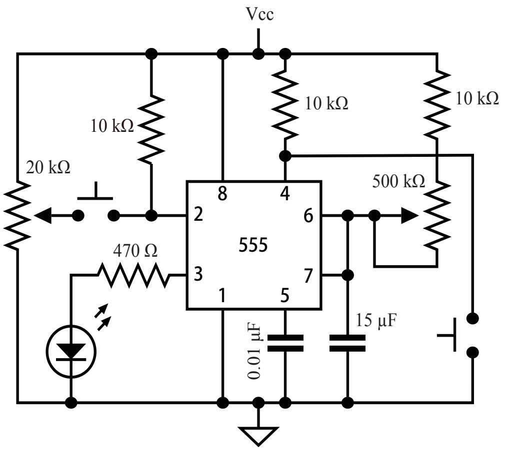


图 4-16　此电路与前面的测试电路功能完全相同，但是芯片的引脚进行了重新排序，以简化电路图

基础知识：定时器持续时间

当你在实验 9 中搭建自己的 *RC* 网络时，进行一些繁琐的计算很有必要，这是为了算出电容器需要多长时间才能达到某一个特定的电压。利用 555 定时器，一切就容易多了。你只需查阅图 4-17 表格中输出脉冲的持续时间即可。表格顶端一行是 7 号引脚和电源正极之间的阻值，定时电容器的值在左侧一列，而表中的数据是脉冲持续的大概时间，单位为秒。

- 不应使用阻值小于 1 kΩ 的电阻器。
- 阻值在 10 kΩ 以下的电阻器也不符合要求，因为它们会增加功率消耗。
- 电容值大于 100 µF 的电容器产生的结果可能不准确，因为电容器的漏电速率之高，堪比充电速率。

如果你想让脉冲持续时间长于 1100 秒或短于 0.01 秒，该怎么办呢？或者如果你想让脉冲持续时间落在表格中某两个数值之间，又该怎么办呢？

你可以使用这个简单的公式，*T* 是脉冲时间，单位为**秒**，*R* 是阻值，单位为**千欧**，*C* 是容值，单位为**微法**。

$$T = R \times C \times 0.0011$$

得到的结果可能不太准确，因为电阻器和电容器的标称值可能不够精确，而且也有环境温度等其他因素的影响。

	10 kΩ	22 kΩ	47 kΩ	100 kΩ	220 kΩ	470 kΩ	1 MΩ
1000 µF	11	24	52	110	240	520	1100
470 µF	5.2	11	24	52	110	240	520
220 µF	2.4	5.2	11	24	52	110	240
100 µF	1.1	2.4	5.2	11	24	52	110
47 µF	0.52	1.1	2.4	5.2	11	24	52
22 µF	0.24	0.53	1.1	2.4	5.3	11	24
10 µF	0.11	0.24	0.52	1.1	2.4	5.2	11
4.7 µF	0.052	0.11	0.24	0.52	1.1	2.4	5.2
2.2 µF	0.024	0.052	0.11	0.24	0.53	1.1	2.4
1.0 µF	0.011	0.024	0.052	0.11	0.24	0.52	1.1
0.47 µF		0.011	0.024	0.052	0.11	0.24	0.52
0.22µF			0.011	0.024	0.052	0.11	0.24
0.1 µF				0.011	0.024	0.052	0.11
0.047 µF					0.011	0.024	0.052
0.022 µF						0.011	0.024
0.01 µF							0.011

图 4-17　555 定时器在单稳态模式下，使用阻值、容值不同的定时电阻器、定时电容器，得到不同的脉冲持续时间（单位为秒）。时间保留两位有效数字

理论：555 定时器单稳态模式下的内部电路

555 定时器的塑料外壳内有硅晶片，上面蚀刻了数十个晶体管结，蚀刻方式太过复杂，此处不予解释。但是，我可以通过把晶体管分成几组来总结它们的功能，如图 4-18 所示。

芯片内部的正负符号是实际分别来自 1 号和 8 号引脚的电源。为了简化说明，我省略了到这些引脚的内部连接。

两个黄色的三角形是**比较器**。每个比较器比较两个输入（在三角形底端），输出一个信号（从三角形的顶端），输出取决于输入是相似还是不同。FF（Flip-Flop）是**触发器**，它是一种逻辑元件，可以有两种状态。我把它画成了双掷开关，但实际上它是固态元件。

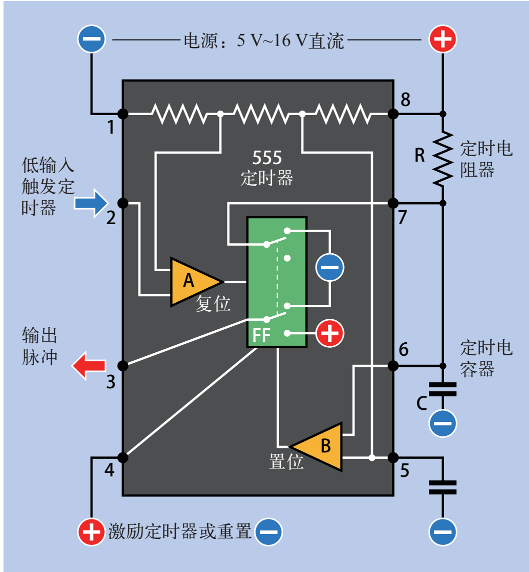


图 4-18　简化的 555 定时器内部功能表示图，连线方法为单稳态模式

最初，在你给芯片通电时，触发器处于“置位”状态，它通过 3 号引脚输出低电压。若触发器从比较器 A 处接收到一个信号，它就转换到“复位”状态，并保持此状态。当触发器从比较器 B 处接收到信号时，它就回到“置位”状态，并保持此状态。比较器上标明的“置位”和“复位”输出会提醒你，当每个输出激活时，开关状态会怎样改变。有些人觉得“Flip-Flop”这个词来自触发器的两个状态“Flip”（弹起）和“Flop”（落下），但是我喜欢把它想成来回摆动。

请注意连接 7 号引脚和电容器 C 的外部导线。只要触发器“置位”，这根导线就使通过电阻器 R 到达 7 号引脚的高电压下降，并阻止电容器获得高电压。

若 2 号引脚上的电压下降到电源电压的 1/3，比较器 A 注意到这个变化，就把触发器转换到“复位”状态。状态转换使 3 号输出引脚发出高电压脉冲，7 号引脚与负极的连接断开。现在，电容器可以通过电阻器充电了。状态转换时，定时器继续输出高电压。

随着电容器两端的电压升高，比较器 B 通过 6 号引脚控制电容器。在电容器两端的电压达到电源电压的 2/3 时，比较器 B 向触发器发送一个脉冲，使触发器回到原来的“置位”状态。状态转换使电容器通过 7 号引脚放电，同时触发器通过 3 号引脚终止高电压输出，用低电压代替。这样，定时器就回到了初始状态。

我总结一下这一系列事件。

❒ 起初，触发器使电容器和输出（3 号引脚）接地。

- ❐ 2 号引脚上的电压下降至电源电压的 1/3 或以下，使输出（3 号引脚）变为高电压，并允许电容器 C 通过电阻器 R 充电。
- ❐ 当电容器两端电压达到电源电压的 2/3 时，芯片给电容器放电，3 号引脚上的输出电压再次变低。

基础知识：脉冲抑制

当设置为单稳态模式的定时器第一次通电时，定时器很容易在静止之前自发发出一个脉冲，然后等待再次被触发。在很多电路中，这个现象非常讨厌。

阻止脉冲产生的一种方法是在重置引脚和接地负极之间放置一个 1 μF 的电容器。第一次接通电源时，电容器吸收重置引脚的电流，并在几分之一秒内保持该引脚处于低电位，这段时间足够阻止定时器发出“唤醒”脉冲。电容器充电后，它就没有其他动作了，一个 10 kΩ 的电阻器使重置引脚保持在高电压下，它就不会干扰定时器的运行了。

我将在随后的实验中使用脉冲抑制的概念。

基础知识：555 定时器很实用

在单稳态模式下，555 定时器会发出固定时长（但可程控）的单脉冲。你能想象到相关应用吗？考虑一下由 555 发出的脉冲控制其他元件。这可以用于户外照明灯的运动传感器。当红外检测器“发现”移动的物体时，灯就亮起，但是只保持特定的一段时间，这可以由 555 定时器控制。

烤箱可以是另一个应用。有人放下一片面包时，开关会闭合，触发烘烤循环。要想改变循环周期，你可以把一个电位器连接到决定烘烤时长的外部控制杆上。在烘烤循环的末尾，555 定时器的输出会经过功率晶体管，激活螺线管（很像继电器，只是没有开关触点）释放烤面包。

555 定时器还可以控制间歇式雨刷，而早期的汽车雨刷确实也是用它控制的。较简单的计算机键盘的按键重复速度也可以由 555 定时器控制——而第二代苹果机确实采用了这种控制方法。

那么实验 15 的防入侵报警器呢？我的愿望清单上有一个特性：报警器应当在发出警报声之前，你有足够的时间关掉它。555 定时器的输出可以满足这个要求。

你刚刚进行的实验看似无关紧要，但它暗藏了多种可能性。

基础知识：双稳态模式

定时器还有另一种使用方法，称为双稳态模式。此模式需要定时器放弃它的基本特性。为什么需要这么做呢？我对此进行讲解。

图 4-19 展示了一个用几分钟就可搭建完成的电路，试一试吧。左侧的两个电阻器是上拉电阻

器，阻值各为 10 kΩ。底端的电阻器阻值为 470 Ω，作用是保护 LED。加上两个触摸开关和定时器芯片，任务就完成了。

连接好面包板后，按下顶端的按钮并释放，LED 就点亮了。能亮多久？只要电路通电，它就会一直亮下去。定时器的输出无限延续。

现在按下底部的按钮并释放，LED 熄灭。熄灭多久？多久都可以。直到你再次按下顶端的按钮，它才会再次亮起。

我说过，定时器内部有一个触发器，而本电路将定时器变成了一个大触发器。当把 2 号引脚接地时，触发器转换为“置位”状态并保持，把 4 号引脚接地时，触发器转换为“复位”状态并保持。触发器在数字电路中非常重要，我将稍后讲解，但是现在这个电路的工作原理是什么，你又为什么要用到它呢？

看一看图 4-20 中的电路图。你可能注意到，图中右侧没有电阻器和电容器，RC 网络被去除了，那么这个定时器电路就没有了定时元件！通常，当你触发定时器时，它的输出脉冲会在 6 号引脚的定时电容器电压上升到电源电压的 2/3 时终止，但是 6 号引脚接地了，因此它的电压无法达到电源电压的 2/3。于是，定时器触发时，输出脉冲永不终止。

当然，你可以给重置引脚加低电压，从而终止输出。但是一旦输出终止，它就会保持终止，直到你再次触发定时器为止。

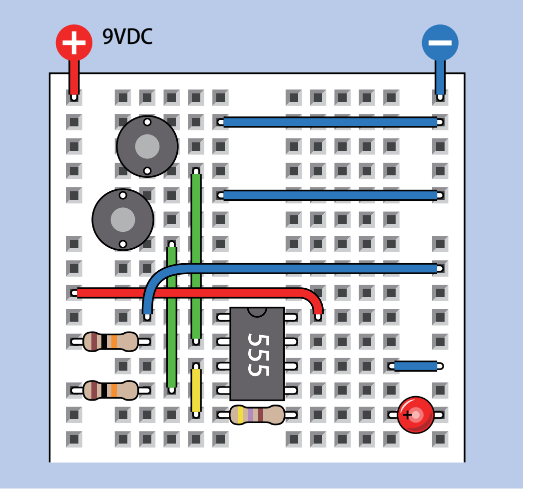


图 4-19　把 555 定时器的功能转变成触发器的面包板电路

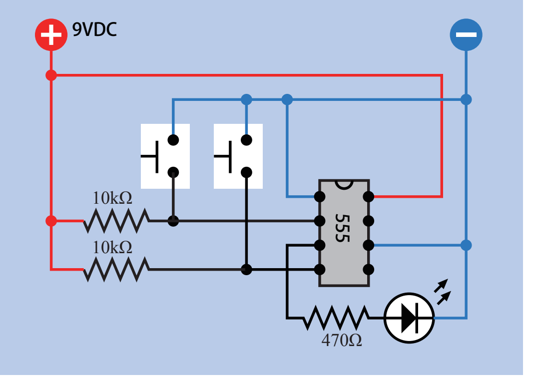


图 4-20　555 定时器的双稳态模式测试电路

这种组态称为双稳态，因为当输出为高电压和低电压时，电路都处于稳态下。这样的简单触发器也可叫作锁存器。

❒ 输入 2 号引脚的低脉冲使输出电压变为正，并锁存。

❒ 输入 4 号引脚的低脉冲使输出电压变为低，并锁存。

在未触发 2 号和 4 号引脚时，要将它们保持在高电位。这就是电路图中加入上拉电阻器的原因。

定时器的 5 号引脚不连接也可以，因为我们将使它进入极端状态，来自其他引脚的任何随机信号都可忽略。

至于为何要这样使用定时器——你会惊讶于它如此实用。我将在本书剩下的三个实验中使用定时器。555 定时器并不是真正为双稳态模式而设计的，但是以它可以很方便地实现双稳态功能。

背景知识：定时器的问世过程

1970 年，硅谷的沃土上刚刚有几家公司落地生根，一家名为西格尼蒂克（Signetics）的公司从一位名叫汉斯·卡曼辛德（Hans Camenzind，见图 4-21）的工程师手里购买了一个创意。这个创意并不是什么巨大突破——只不过是 23 个晶体管和几个电阻器构成的可编程定时器。定时器电路用途繁多，而且非常稳定、简单，但是这些优点与它最初的产品特色相比起来就相形见绌了。利用正在兴起的集成电路技术，西格尼蒂克公司把整个电路蚀刻到了硅芯片上。



图 4-21　汉斯·卡曼辛德，西格尼蒂克公司 555 定时器芯片的发明者、设计者和开发者

定时器的发明经历了反复的尝试和错误。卡曼辛德独自工作，起初搭建了大规模的完整电路，在面包板上用现成的晶体管、电阻器和二极管进行连接。电路成功了，然后他就开始微调各元件的值，以观察电路是否能容忍生产过程中的各种变量，以及芯片使用时的温度变化等因素。他至少搭建了十个不同版本的电路，这一过程持续了数月。

下一步是手工制作。卡曼辛德坐在制图桌旁，用一把特殊装配的美工刀把电路刻在一大片塑料板上。西格尼蒂克公司把电路图严格按照 300 : 1 的比例缩小，刻蚀在硅晶片上，然后把每个晶片安装在半英寸长的长方形黑色塑料封装内，封装顶部印刷有产品编号。这样，555 定时器就问世了。

555 定时器成为了史上最成功的芯片，不仅在于它巨大的销售量（以数百亿片计算），还在于它的设计寿命（近 40 年都没有明显改变）。555 定时器用在各种设备上，从玩具一直到航天器。它可以使电灯闪烁，激活报警系统，给蜂鸣声加入间隔，也可以自己发出蜂鸣声。

今天，芯片由大团队设计，利用计算机软件模拟芯片的特性，达到测试效果。因此，计算机内部的芯片促成了新芯片的设计。像汉斯·卡曼辛德这样的个人设计师的全盛时期已经过去，但是他的才华存在于每一片加工生产出的 555 定时器芯片中。如果你想更多地了解芯片的历史，请访问晶体管博物馆（http://semiconductormuseum.com/Museum_Index.htm）。

我要在这里说一件私下里的小事。2010 年，写作本书第 1 版时，我在网上查找汉斯·卡曼辛德

的资料，发现他有自己的主页，还有电话号码。我一时心血来潮，给他打了电话。我与自己使用了30多年的芯片的制造者谈话，这个时刻是多么奇异。汉斯很友善（但是他没有多费口舌），很快就同意了帮我审读书稿。他读完书稿后，还给予了大大的认可。

随后，我购买了他写的电子学简史 *Much Ado About Almost Nothing*。这本书现在网上依然有售，我强烈推荐。能有机会与集成电路设计的先驱之一交流，我感到万分荣幸。汉斯于2012年逝世，我对此深表伤怀。

基础知识：555定时器的规范

- 555定时器可以在5 V~16 V直流电压下稳定工作，其最大电压限度是18 V直流。很多数据表规定的工作电压是15 V直流。电压不需用稳压器控制。
- 多数生产商建议与7号引脚连接的电阻器阻值在1 kΩ至1 MΩ之间，但是10 kΩ以下的电阻器通过的电流更大。减小电容器的值比减小电阻器的值效果更好。
- 如果你希望测定非常长的时间间隔，那么电容器的容值可以任意大，但是定时器的准确性会下降，因为电容器的漏电速率已经堪比充电速率。
- 定时器造成的压降比晶体管或二极管的压降都大。输入电压和输出电压之间的差值可以达到1 V以上。
- 额定的输出电流比输入电流高200 mA或低200 mA，但是100 mA以上的输出电流会拉低电压，会影响定时准确性。

注意：并非所有定时器都相同

目前为止我所叙述的一切内容都适用于老式的“TTL”型555定时器。TTL是**晶体管–晶体管逻辑**（Transistor-Transistor Logic）的缩写，比现代的CMOS芯片更早，消耗的电能也更多。TTL型定时器也叫作**双极型定时器**，因为定时器内部包含双极型晶体管。

555原型定时器的优点是它很便宜，也很坚固。它不容易损坏，它的输出功率也很高，可以直接连接到继电器线圈或小型扬声器。但是，555定时器的效率不高，且容易产生电压尖脉冲，有时会干扰其他芯片的运行。

为解决这些缺点，人们利用CMOS晶体管制造了新的555定时器，它消耗的功率更少，也不会产生电压尖脉冲，但是它的输出功率受到限制。受到多少限制呢？因特定的生产商而异。

很遗憾，CMOS类型的555定时器缺少制造标准。有的定时器能输出100 mA的电流，而有的只能输出10 mA。

CMOS定时器的部件编号多种多样，比较混乱。7555清楚标示为CMOS定时器芯片，但是其他编号只是在555前面加上了不同的字母组合，需要你自己注意并理解它们的含义。

本书中，为避免混乱，便于理解，我将仅使用 TTL 型（也称为双极型）的 555 定时器。如果你想自己购买，请参考第 6 章**其他元件**一节，找到第 4 章的**购物清单**，获取购买定时器的建议。

实验 17：设置你的音调

现在你已经熟悉了 555 定时器的单稳态模式和双稳态模式，我想让你熟悉一下**非稳态**模式，这样命名的原因是，定时器的输出不断在高低之间波动，不在任何一种状态下保持稳定。

非稳态输出类似于实验 11 中搭建的晶体管振荡器的输出，只是非稳态输出更加灵活，更易控制，它不需要两个晶体管、4 个电阻器和两个电容器来触发振荡，只需要一片芯片、2 个电阻器和一个电容器即可。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 电源（电池或交流适配器）
- ❒ 555 定时器芯片 4 枚
- ❒ 微型扬声器 1 个
- ❒ 电阻器：47 Ω 1 个、470 Ω 4 个、1 kΩ 2 个、10 kΩ 12 个、100 kΩ 1 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 8 个、0.022 μF 1 个、0.1 μF 1 个、1 μF 3 个、3.3 μF 1 个、10 μF 4 个、100 μF 2 个
- ❒ 1N4148 二极管 1 个
- ❒ 100 kΩ 微调电位器 1 个、触摸开关 1 个
- ❒ 通用 LED 4 个

非稳态测试

图 4-22 展示了一个通用的非稳态测试电路。我在输出端放置了一个扬声器，因为定时器将以音频运行。扬声器通过电阻器和耦合电容器驱动，电阻器限制电流，而电容器通过音频信号，阻碍直流信号。元件的值将在下一幅电路图中标出。现在我只想让你看到整体布局。

标为 R1、R2 和 C1 的元件控制定时器的速度。生产商的数据表和其他资源经常使用这种标记，因此我遵循了相同的传统。

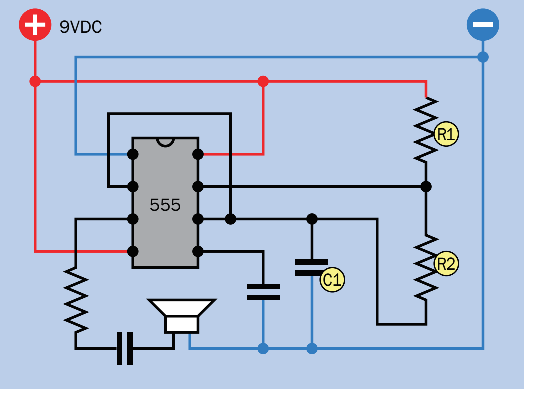


图 4-22　在非稳态模式下运行 555 定时器的基本通用电路

C1 与图 4-11 单稳态电路中的定时电容器作用相同。电路需要 2 个而非 1 个电阻器的原因将在下面讲解。

利用在实验 16 中所学到的知识，你是否能理解图中电路的工作方式呢？你可能首先注意到电路并没有输入。2 号引脚（触发引脚）回连到了 6 号引脚（高触发引脚）上。你知道电路将如何工作吗？ C1 上将积累电荷，与定时器处于单稳态时相同，直到其两端电压达到电源电压的 2/3 时为止，然后就将通过 R2 向 7 号引脚放电，C1 上电压下降。C1 与 2 号引脚连接意味着触发引脚能感受到 C1 上电压的降低。当电压突然降低时，触发引脚又将做什么呢？它触发了定时器。因此，在这种配置下，定时器会再次触发自身。

这一系列动作有多快呢？建议你搭建一个测试电路，自己探究一下。图 4-23 中，我给出了元件的建议取值，并重新绘制了电路图，加入了微调电位器，这样你就能看到（不如说听到）电位器阻值变化的影响。电位器和它前面的 10 kΩ 电阻器一起组成 R2。定时电容器 C1 为 0.022 μF，R1 为 10 kΩ。

图 4-24 展示了面包板电路布局，而图 4-25 展示了各元件的值。

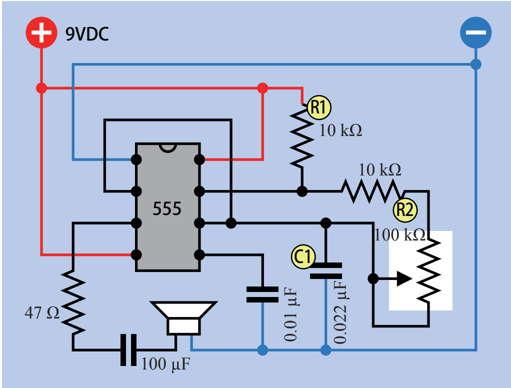


图 4-23　此测试电路允许你调节定时器在非稳态模式下的性能

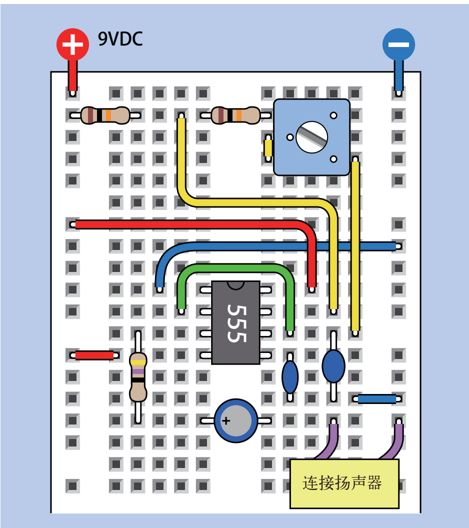


图 4-24　非稳态定时器测试电路的面包板布局

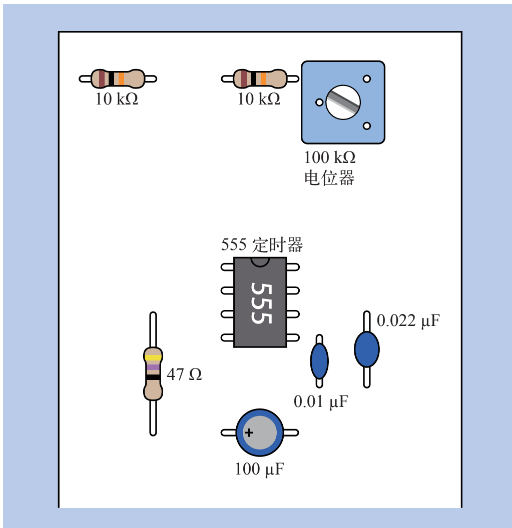


图 4-25　非稳态定时器测试电路的元件取值

接通电源后，会发生什么呢？你立即就会通过扬声器听到噪声。如果什么也听不到，你应该是出现了接线错误。

注意，芯片不需再用按钮开关激活了。555 定时器能够自我触发，如前所述。

旋转微调电位器上的螺钉，噪音的音调随之变化。电位器调节的是 C1 充放电的速率，而该速率决定了声音信号中，一个“置位”循环相对于下一个“复位”循环的长度。在给定的元件值下，音频振荡频率为每秒 300~1200 脉冲。脉冲由定时器发送到扬声器，它们使扬声器的纸盒上下振动，在空气中形成压力波，你的耳朵接收到压力波并响应为声音。

理论知识：输出频率

声音的**频率**是每秒钟完整振动周期的个数，包括高压脉冲和其后的低压脉冲。

赫兹是频率单位，意为“每秒周期数”。它是欧洲人引进的，得名于另一位电学先驱海因里希·赫兹（Heinrich Hertz）。赫兹的简写是 Hz，因此测试电路中，555 定时器的输出频率约为 300~1200 Hz。

大多数标准单位中，可以加入字母 k 表示“千”，因此 1200 Hz 通常写作 1.2 kHz。

定时电容器和电阻器的值如何决定定时器频率？如果 *R*1 和 *R*2 的阻值单位为千欧，*C*1 容值的单位为微法，频率 *f* 单位为赫兹，则可得到关系式：

$$f = 1440/(((2 \times R2) + R1) \times C1)$$

公式的计算很繁杂，因此我在图 4-26 中提供了一张数据表。表中，**我假设电路中的 *R*1 阻值固定为 10 kΩ**。表格顶端一行的值是 *R*2 的取值，而左侧一列的值是定时电容器 *C*1 的取值。

你可能记得 pF 代表“皮法”，即一微法的百万分之一。纳法介于微法和皮法中间，但这个单位在美国并不常用，因此我没有在表格中使用它。

	10 kΩ	22 kΩ	47 kΩ	100 kΩ	220 kΩ	470 kΩ	1 MΩ
47 μF	1	0.57	0.3	0.15	0.068	0.032	0.015
22 μF	2.2	1.2	0.63	0.31	0.15	0.069	0.033
10 μF	4.8	2.7	1.4	0.69	0.32	0.15	0.072
4.7 μF	10	5.7	3.0	1.5	0.68	0.32	0.15
2.2 μF	22	12	6.3	3.1	1.5	0.69	0.33
1.0 μF	48	27	14	6.9	3.2	1.5	0.72
0.47 μF	100	57	30	15	6.8	3.2	1.5
0.22 μF	220	120	63	31	15	6.9	3.3
0.1 μF	480	270	140	69	32	15	7.2
0.047 μF	1 k	570	300	150	68	32	15
0.022 μF	2.2 k	1.2 k	630	310	150	69	33
0.01 μF	4.8 k	2.7 k	1.4 k	690	320	150	72
4,700 pF	10 k	5.7 k	3 k	1.5 k	680	320	150
2,200 pF	22 k	12 k	6.3 k	3.1 k	1.5 k	690	330
1,000 pF	48 k	27 k	14 k	6.9 k	3.2 k	1.5 k	720
470 pF	100 k	57 k	30 k	15 k	6.8 k	3.2 k	1.5 k
220 pF	220 k	120 k	63 k	31 k	15 k	6.9 k	3.3 k
100 pF	480 k	270 k	140 k	69 k	32 k	15 k	7.2 k

图 4-26　555 定时器在非稳态模式下运行时，假设 R1 阻值固定为 10 kΩ，表格顶端一行为标准电路中 R2 的阻值。表格中的数字为定时器输出信号的频率，单位 Hz（每秒周期数）

理论知识：555 定时器非稳态模式下的内部电路

为了更好理解定时器在非稳态模式下的运行情况，请观察图 4-27。定时器的内部配置与单稳态

模式完全相同，但外部连接方式不同。

最初，触发器使定时电容器 C1 接地，和以前一样。但是现在电容器上的低电压通过外部导线从 6 号引脚传递到 2 号引脚，使定时器芯片触发自身。触发器顺从地转换到“置位”状态，向扬声器发送一个正脉冲，同时改变 6 号引脚上的低电压。

现在，C1 开始充电，和定时器处于单稳态模式时相同，不同之处在于，它现在通过串联的 R1 和 R2 充电。因为 C1 的容值较小，所以它充电很快。当它的电压达到电源电压的 2/3 时，比较器 B 和以前一样开始动作，使电容器放电，终止 3 号引脚的输出脉冲。

电容器通过 R2 在 7 号引脚（放电引脚）上放电。放电时，电容器上的电压迅速减小，而电压仍然与 2 号引脚相连。当电压下降至电源电压的 1/3 或以下时，比较器 A 开始动作，向触发器发送另一个脉冲，使整个过程重新开始。

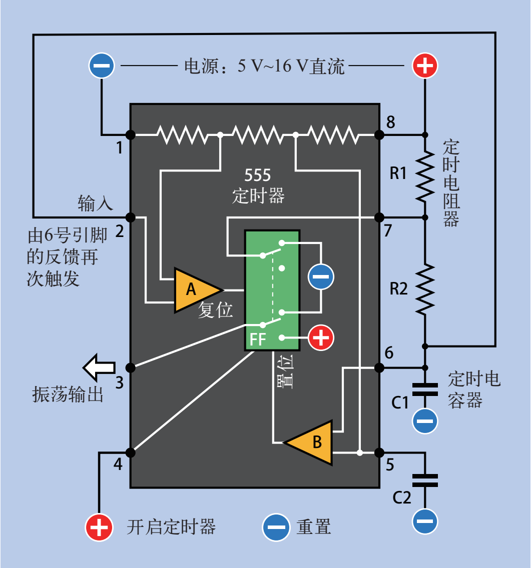


图 4-27　555 定时器的内部电路图，外部连接方式使它在非稳态模式下运行

基础知识：不均等的置位 – 复位循环

当定时器在非稳态模式下运行时，C1 通过串联电阻器 R1 和 R2 充电，但是 C1 只通过 R2 放电。因为电容器通过两个电阻器充电，但只通过其中一个电阻器放电，所以它的充电速度比放电速度慢得多。充电时，3 号引脚上的输出为高电压；放电时，3 号引脚上的输出为低电压。因此，“置位”在循环中总是比“复位”时间更长。图 4-28 通过简单的波形图展示了这个现象。

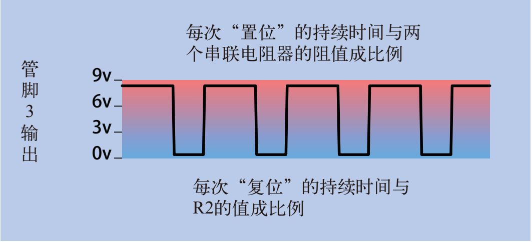


图 4-28　555 定时器芯片连接成标准非稳态模式电路时，输出的高脉冲总是比脉冲间隙长

若希望“置位”和“复位”持续的时间相等，或者想进行单独调节（例如你想向另一个芯片发送非常短的脉冲，脉冲间的间隙比脉冲时间长），你所需要做的就是添加一个二极管，如图 4-29 所示。（因为二极管上有压降，所以电源电压大于 5 V 直流时，电路的工作效果更好。）

现在当 C1 充电时，电流像从前一样流过 R1，却通过二极管把 R2 短路了。当 C1 放电时，二极管阻断放电方向的电流，因此电流从 R2 流过。

现在 R1 独自控制充电时间，而 R2 控制放电时间。计算频率的公式现在近似为：

$$f = 1440/((R1 + R2) \times C1)$$

R1 和 R2 的阻值单位为千欧，C1 的容值单位为微法。（我使用了“近似”一词，因为二极管向电路中加入了很小的有效电阻，但公式中并没有考虑。）

如果 R1 和 R2 阻值相等，置位 / 复位持续时间就会近似相等。

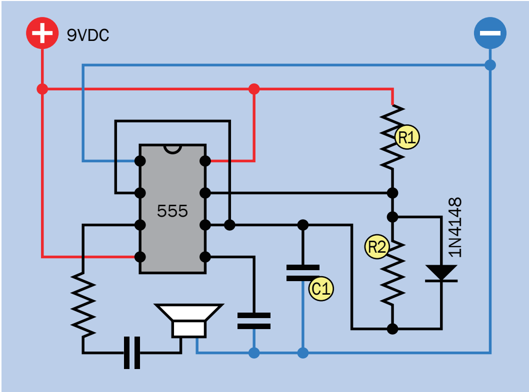


图 4-29　增加一个二极管，将 R2 旁路，定时器的高输出和低输出可以单独调节

非稳态修正

定时器的频率可以通过 5 号引脚（控制引脚）进行有限度的控制，而不必使用电位器改变 R2 的阻值，如图 4-30 所示。

拆下与 5 号引脚相连的电容器，用如图所示的串联电阻器代替。电阻器保证 5 号引脚和电源正极或负极之间至少有 1 kΩ 的电阻。直接把定时器连接到电源两端虽然不会损坏定时器，但是会阻碍它产生可听音。随着你转动电位器，定时器的输出频率将改变，这是因为你改变了芯片内部比较器 B 两端的参考电压。

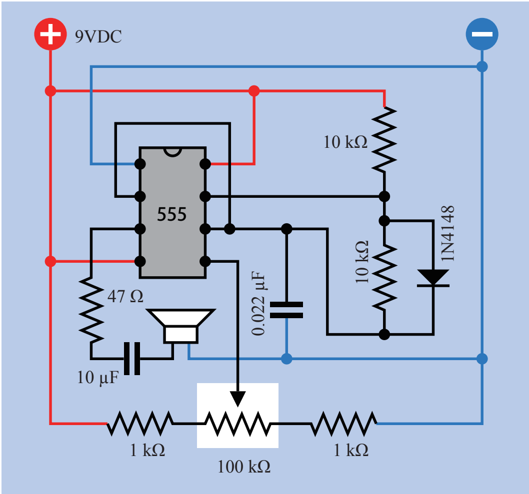


图 4-30　说明 555 定时器 5 号引脚（控制引脚）功能的电路

芯片链锁

定时器芯片可以用四种方式实现链锁。注意，无论定时器正在单稳态还是非稳态模式下运行，这些配置都可以工作，特殊情况会有所标记。

- ❒ 如果你使用 9 V 电源给 555 定时器供电，那么该定时器的输出足够为另一个 555 定时器供电。
- ❒ 一个定时器的输出可以触发另一个定时器的输入，但只有第二个定时器处于单稳态模式时才可行。在非稳态模式下，第二个定时器将自我触发。

- 一个定时器的输出可以解锁另一个定时器的重置引脚。
- 一个定时器的输出可以通过合适的电阻器连接到另一个定时器的控制引脚上。

图 4-31、图 4-32、图 4-33 和图 4-34 展示了以上四种方式。

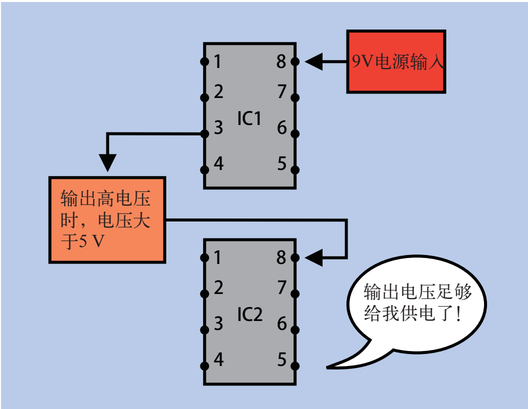


图 4-31　一个定时器给另一个定时器供电

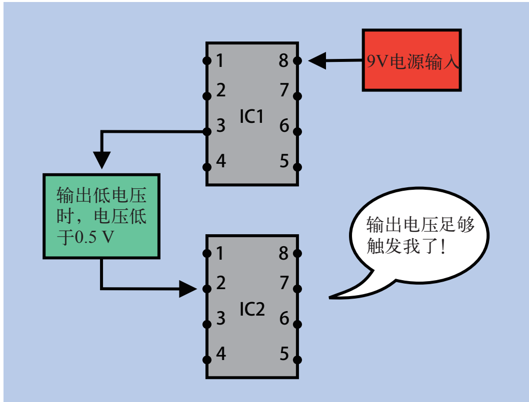


图 4-32　一个定时器触发另一个定时器

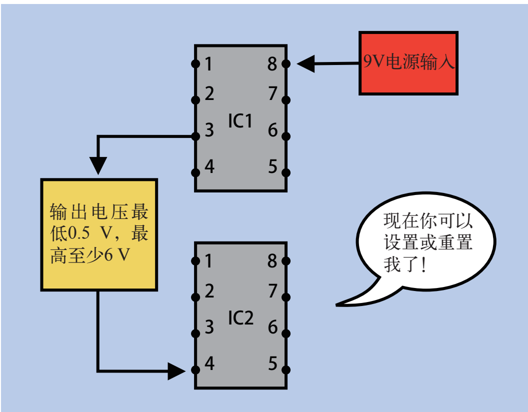


图 4-33　一个定时器设置或重置另一个定时器

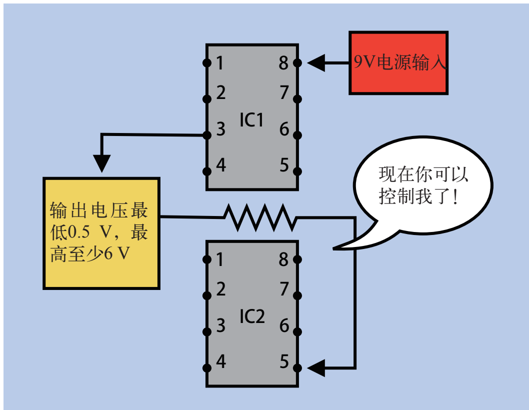


图 4-34　一个定时器控制另一个定时器的频率

为什么要把定时器链锁在一起呢？因为你有可能想让几个定时器都在单稳态模式下运行，这样第一个定时器发出的高电压脉冲的下降沿就触发了第二个定时器高电压脉冲的上升沿，反之亦然。实际上，你可以链锁任意多个定时器，让最后一个定时器的输出反馈到第一个定时器并形成触发，这样它们就可以让一连串 LED 依次闪烁，就像圣诞灯光一样。

图 4-35 展示了四个按此方式连接的定时器。它们通过耦合电容器相连，因为前一个定时器发出短脉冲，触发下一个定时器即可。如果没有电容器，第一个定时器发出的脉冲的下降沿会触发第二个定时器，但第一个定时器的输出会保持低电压，从而会无限地触发第二个定时器。

另外，每个定时器的触发引脚上必须连有 10 kΩ 的上拉电阻器，使其一直保持高电压。

单稳态定时器链锁到一起时，就会出现一个有趣的问题——它们如何启动呢？我在实验 16 中提到过，单稳态模式下的 555 定时器第一次通电时，通常会自发产生一个脉冲。当多个定时器链锁到一起时，它们都会同时自发产生脉冲，而且由于微小的制造差异，结果可能难以预测。有时它们会条不紊地依次闪烁，但也有时会成对闪烁。

解决方法是应用我在实验 16 中讲过的脉冲抑制的概念（请参考基础知识：脉冲抑制一节）。

重置引脚和接地负极之间的 1 μF 电容器能使重置引脚暂时保持低电压，时间恰好足够抑制定时器的初始脉冲。连接到定时器重置引脚的 10 kΩ 上拉电阻器会在定时器运行时保持它的稳定。

根据我的经验，这一方法很有效，但是不同生产商的定时器特性可能不太相同，这可以理解，因为重置引脚的特性没有正式规定。如果脉冲抑制有困难，就试着换一个更大或更小的电容器吧。

链锁定时器的唯一问题是脉冲抑制的效果太好。接通电源，然后什么也没有发生，因为所有的定时器输出都被抑制了。

这种情况的应对方法是省略一个定时器的脉冲抑制。当定时器通电时，它几乎必然会发送一个初始脉冲，这个脉冲会依次触发后面的定时器。电路布局如图 4-35 所示。

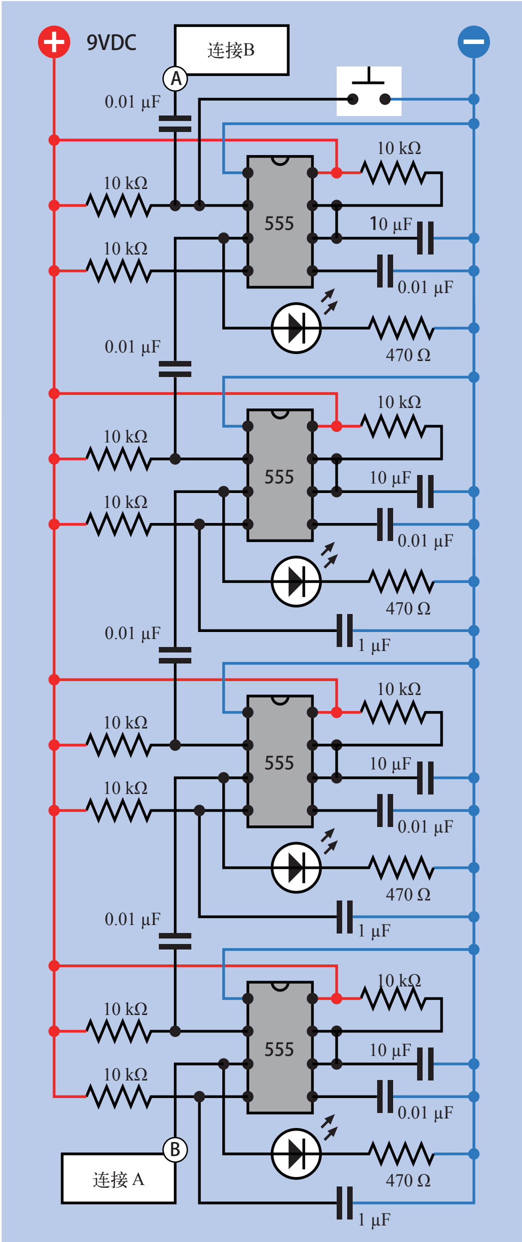


图 4-35　四个定时器连接成再循环序列，互相触发

但是——请稍等，“几乎必然”是什么意思？电路应当一直能运行，而不是“几乎”一直能运行。

我同意这个观点，但是我不能控制 555 定时器的这一倾向，它在通电时就是会产生难以预测的响应。因此我在电路顶端增加了一个按钮，如果电路不能自己启动，就可以用按钮启动连锁响应。

还有一种选择方案：使第一个定时器在非稳态模式下运行。它发送一连串脉冲，输入其他在单稳态模式下运行的定时器，最后一个定时器的输出不反馈到第一个定时器的输入。在电子学术语中，第一个定时器是主设备，而其余的是从设备。

我喜欢这种布局，因为响应完全可以预测。问题是，你需要调节主定时器的速度，使它在链锁的最后一个从定时器刚刚结束脉冲输出时，恰好开始输出下一个脉冲。否则，在最后一个脉冲结束之前，第一个定时器就会输出下一个脉冲，或者在最后一个脉冲和下一轮的第一个脉冲之间存在时间间隔。

时间控制的重要性取决于具体应用。闪烁指示灯的时间控制不是什么难题，但是如果你提高脉冲输出速度以驱动步进电机，精确控制时间就比较困难了。

发出警笛声

我在图 4-34 中列举的第四种芯片链锁的方法特别有趣，这样定时器可以发出警笛声，很像防盗报警器。实际上，这一电路可以用作实验 15 中警报器未完成的音频输出部分。

具体电路如图 4-36 所示。1 号定时器连接成基本的非稳态电路，与图 4-22 中的电路相似。本电路中的元件值更大，因此定时器的振荡频率更低，约为 1 Hz。你可以将它与图 2-120 中的电路相比较，原理是类似的。

2 号定时器也连接成基本的非稳态电路，频率约为 1 kHz。电路设计的目的是 1 号定时器电压的缓慢振荡输入到 2 号定时器的控制引脚上，迫使 2 号定时器上下调节声音频率，类似警报系统的报警发声过程。

建议你自己搭建这个电路，因为你可能在即将到来的实验 18 中用它制造出防入侵报警器的最终版本。图 4-37 展示了警笛电路的面包板布局，图 4-38 展示了各元件的取值。

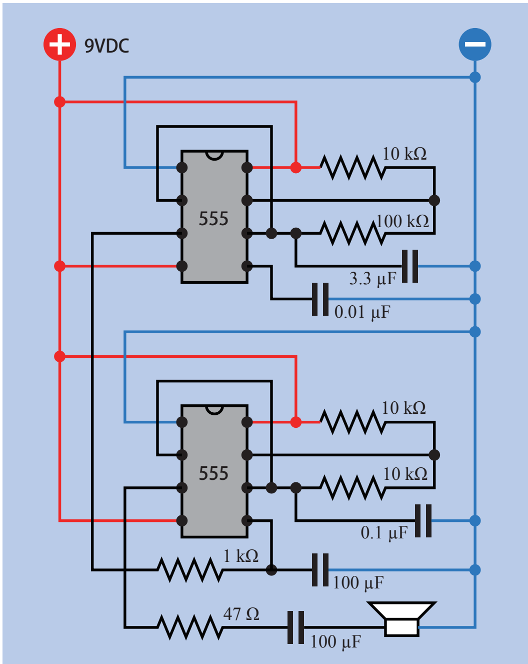


图 4-36　当一个定时器运行速度相对较慢时，通过另一个定时器的控制引脚（5 号引脚）调节另一个定时器，结果产生频率来回变化的声波，类似于警笛声

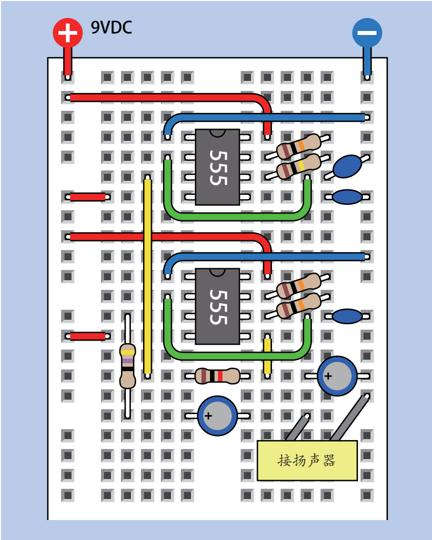


图 4-37　面包板上的警笛电路

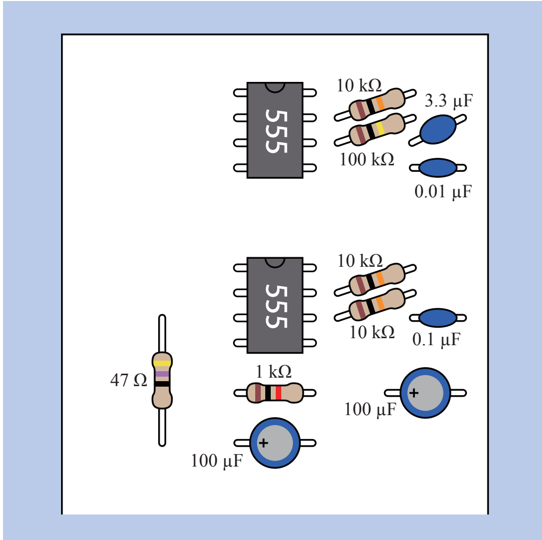


图 4-38　警笛电路各元件取值

电路正常运行后，更换 6 号引脚和地之间连接的 100 µF 电容器，将会十分有趣。电容器使频率平稳地高低变化，而不是急剧上下跳动。它的使用方法与我在实验 11 中利用电容器使 LED 亮度渐变的方法一致。

你可以用其他方法修饰警笛声，以下是一些建议。

- ❒ 改变 0.1 µF 定时电容器的值，提高或降低基础声音的音调。
- ❒ 把 6 号引脚上的 100 µF 电容器的值加倍，或者改成两个 50 µF 电容器串联。
- ❒ 用 10 kΩ 电位器代替 1 kΩ 电阻器。
- ❒ 改变 3.3 µF 电容器的值。

制作东西的一部分乐趣来自自定义——自己设计制作。调出满意的警笛声后，请记录下所有元件的取值，以备日后参考。

顺便说一下，通过使用一片 556 定时器而非两片 555 定时器，可以减少芯片的数量。556 芯片的封装内部有两片 555 定时器。但是因为外部电路要进行的连接一样多（电源只需一个即可），所以我还没有尝试使用 556 定时器。

实验 18：（基本）完成防入侵报警器

现在你已经了解了 555 定时器的功能，就可以实现防入侵报警器愿望清单上剩下的要求了。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 555 定时器 2 个
- ❒ 双极双掷 9 V 直流继电器 1 个
- ❒ 2N2222 晶体管 2 个
- ❒ LED：红色、绿色、黄色各 1 个
- ❒ 面包板用单极双掷滑动开关 2 个
- ❒ 触摸开关 1 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 1 个、10 μF 2 个、68 μF 2 个
- ❒ 电阻器：470 Ω 4 个、10 kΩ 4 个、100 kΩ 1 个、1 MΩ 2 个
- ❒ 1N4001 二极管 1 个

以下是可选元件（用于音频输出）。

- ❒ 图 4-36 所示元件

可选元件（制造成品电路）

- ❒ 15 W 烙铁
- ❒ 细焊丝
- ❒ 镀铜的面包板布局多孔板
- ❒ 单极单掷或双极双掷拨动开关 1 个
- ❒ 单极单掷按钮开关 1 个
- ❒ 项目盒 1 个，至少 6×3×2 英寸
- ❒ 电源插头和配套电源插座（各 1 个）
- ❒ 布置房屋所需的数量足够的磁传感开关
- ❒ 布置房屋所需的足够长的导线

三个步骤打造功能器件

这个电路比你以前搭建过的电路都大、都复杂，但是比较容易搭建，因为你可以把它分成三个部分，各自进行独立测试。最终你会做成如图 4-45 所示的面包板电路，元件取值如图 4-46 所示，等效电路图如图 4-47 所示。但是我们先要从一个小定时器电路开始。

第 1 步

仔细观察一下图 4-39。注意，在 555 定时器的右侧没有定时元件，你可以把该电路归为我在实

验 16 中所讲过的双稳态电路（请参考图 4-20）。定时器被触发时，它的输出将无限继续，很适合报警系统。

但是还有很多别的原因。本电路有一分钟的宽限期，允许你进入警戒区域后，在警报响起之前关闭报警器。还记得这是我为实验 15 编写的愿望清单上的第 9 条吧？

为了观察电路的工作方式，你可以按图 4-40 搭建电路。元件的取值如图 4-46 所示，它们布置在面包板底部，如图 4-45 所示。

电路采用这样的布局很重要，因为你需要为后来添加的电路部分留出空间，其中一部分电路会为图 4-40 所示的电路提供电能。

为确保所有元件连接正确，右侧的 1 MΩ 电阻器应安装在面包板从上向下数的第 29 行。还要注意的是，通电位置在元件附近而非面包板顶端，而正极总线未使用。

先不要给电路通电，把万用表设置为测量直流电压，量程至少为 10 V，把表笔放置在图 4-40 中所示的测量点上，负表笔接触负极总线，正表笔接触 1 MΩ 电阻器的左端。

现在接通电路，你会发现万用表的示数从 9 V 开始缓慢下降。当电压下降到电源电压的三分之一时，555 定时器触发，红色 LED 亮起。LED 的加入是出于测试需要，在最终版电路中，你将用噪音发生电路代替它。

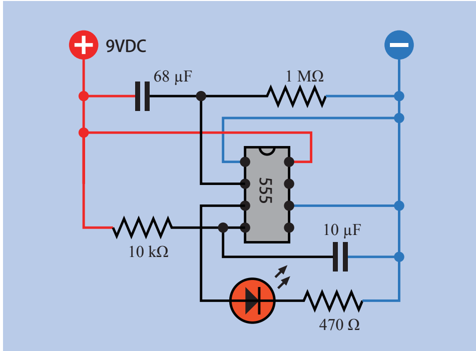


图 4-39　面包板电路下半部分的等效电路图

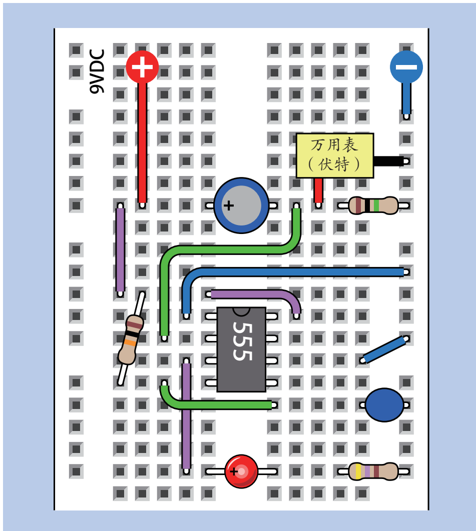


图 4-40　元件安装在面包板电路的下半部分，以便测试

68 µF 的大电容器使定时器的响应延迟。当你第一次给电路通电时，电容器将初始脉冲通过它和 1 MΩ 电阻器中间的一点。绿色的导线连通这一点和定时器的触发引脚。因此，触发引脚上最初是高电压，你是否记得定时器直到触发引脚上电压变低时才会触发？

电容器右侧的电压通过 1 MΩ 电阻器缓慢泄漏，最终电压下降到足够低的水平，触发定时器。

对于电路的其他部分，我在实验 16 和 17 中阐述了如何进行“脉冲抑制”，以阻止定时器在第一次通电时产生脉冲。这就是我把 10 µF 的电容器和 10 kΩ 的电阻器连接到 4 号引脚（重置引脚）上的原因。我这次使用了 10 µF 的电容器而非 1 µF 的电容器，因为这个电路比实验 17 中的电路反应速度

略慢一些。

- 你可以将 555 定时器与这些元件配合使用，把定时器对触发脉冲的响应输出延迟一定时间。
- 若想使延迟时间更长或更短，可以把 68 μF 的电容器换成容值更大或更小的电容器。

目前为止一切顺利。这一部分电路通电时会引入延迟，而延迟过后，它将无限期地激活报警电路。

第 2 步

图 4-41 和图 4-42 展示了搭建电路的下一个步骤。前面放置的元件位置保持不变，但是画成了灰色，目的是帮助你把注意力集中在新添加的元件上。

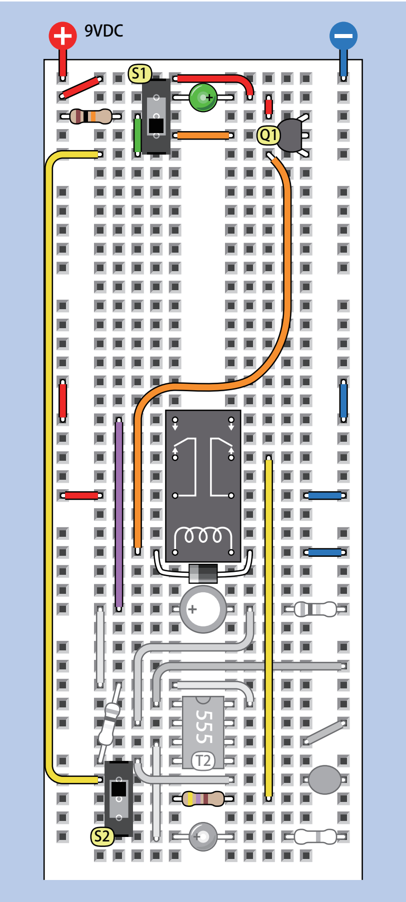


图 4-41 搭建此电路的第 2 步包含了实验 15 中用到的继电器配置

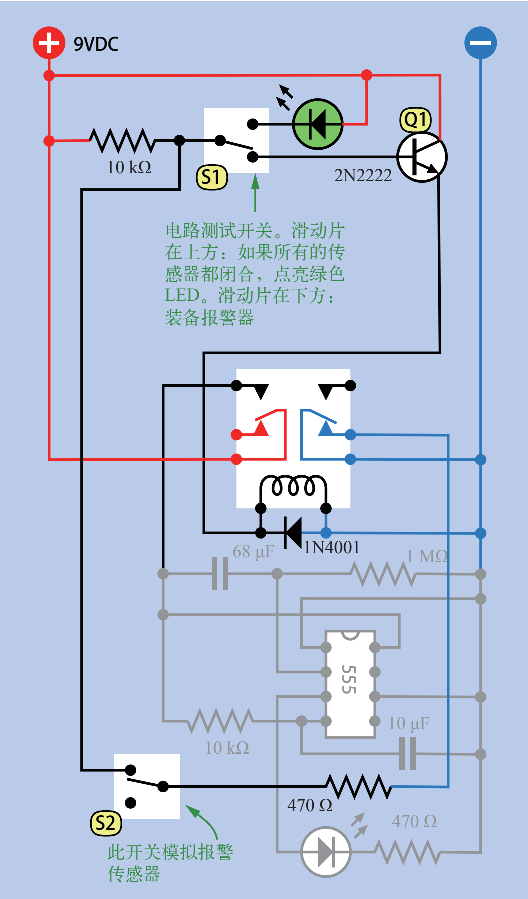


图 4-42 面包板电路第 2 步的等效电路图

不要忘记把滑动开关 S2 安装在电路底部，旁边连接 470 Ω 的电阻器以及两根长长的黄色导线。加入滑动开关的目的是进行测试，它代表了实际应用中的报警传感器。

继电器的作用与它在实验 15 中的作用相同。实际上，如果查探电路中的连接点，你会发现它与图 3-88 中电路的工作方式相同，只是进行了一些细微的调整。

仔细安装好所有的元件，不要忽略了左侧的三根红色导线和右侧的三根蓝色导线。要确认继电器的引脚是否与各自的导线相对应。

仔细检查并确认 S1 的滑动块在下方，S2 的滑动块在上方。为了测试之需，移除 68 μF 的电容器，这样红色的 LED 就会立即响应，而不会先等待一分钟再响应。

接通电源，如果所有的接线都正确，应该没有现象。开关 S2 代表报警传感器，它的滑动块在上方时，模拟的是传感器闭合的状态。将滑动块下滑，模拟传感器断开的状态，电路底部的测试 LED 应当立即亮起。将滑动块上滑，LED 会保持点亮。电路将报警器锁定在开启状态，不论触发器是否已经重置。

断开电源，保持 S2 的滑动片在上方（模拟闭合的传感器），再重新接通电源。现在把 S1 的滑动片上滑，绿色 LED 点亮。这是电路的测试特性，证实了所有传感器都处于闭合状态。当你使用报警器时，在离开警戒区之前，也最好先进行一下这个测试。电路的这个功能满足了实验 15 愿望清单中第 7 条的第一部分。

保持 S1 的滑动片在上方，把 S2 的滑动片下滑，模拟断开的传感器。绿色的 LED 熄灭。把 S2 的滑动片上滑，绿色的 LED 再次点亮，证明测试流程有效。

下面是电路的实际运行方法。S1 的滑动片要保持在上方（测试位置）。当你准备好离开警戒区时，给电路接通电源，如果绿色的 LED 没有点亮，说明某处有门窗未关好。找到问题的源头并纠正。绿色的 LED 点亮时，说明所有的传感器都处于闭合状态，现在可以装备报警器了。把 S1 的滑动片下滑，绿色的 LED 熄灭，报警器装备好了。当你回到家时，555 定时器让你有一分钟的时间（前提是，电路中连入的是 68 μF 的电容器）关闭报警器，防止它报警。你可以把 S1 的滑动片滑回上方（测试位置），关闭报警器。

那么，电路是如何工作的，它又为什么能工作呢？

当开关 S1 的滑动片在下方时，电路左上方 10 kΩ 的电阻器通过 S1 与晶体管 Q1 的基极相连。同时，继电器内部右侧的极性触点与接地负极连接，具体连接方式为通过右侧的黄色导线、470 Ω 电阻器和开关 S2（模拟传感器），通过另一根较长的黄色导线连回 S1。电路通过橘黄色的导线使晶体管基极保持低电压。只要基极上的电压低，晶体管就不会导通。

如果有传感器断开，那么晶体管的基极不再保持低电压，10 kΩ 电阻器使基极电压升高，晶体管导通。晶体管通过长而弯曲的橘黄色导线触发继电器，而继电器向双稳态定时器供电，定时器将最终激活报警器。同时，继电器断开右侧与接地负极的连接，因此现在晶体管会继续导通，尽管传感器已经再次闭合。

这个电路的概念与我在图 3-88 中传达的概念完全一致，最大的差别是绿色 LED。当你把 S1 的滑动片移到“测试”位置时，它就截断了通向晶体管的高电压（因此晶体管无法启动报警器）。如果所有传感器都处于闭合状态，LED 就通过这一串传感器和 470 Ω 电阻器连接到接地负极，它会点亮，告诉你系统已经就绪。

第 3 步

我们这个项目还可能需要什么呢？请想象一下你正在使用报警系统，你需要在离开警戒区之前设置好它。此时，你突然意识到如果你设置好了系统，然后开门离开，就会触发报警器。

双稳态定时器和 68 μF 的电容器能抑制报警器一分钟，在你到家后给你足够的时间关闭报警器。现在我们需要另一个定时器，在你离家时抑制报警器一分钟。

这就更难设计了。关键是要让新添加的定时器下拉晶体管 Q1 上的电压，使它不能触发继电器。

问题是，定时器在“置位”阶段输出为高电压，而非低电压。我将不得不再添加一个晶体管来转换它的输出电压，使该电压把晶体管 Q1 基极上的电压拉低。

图 4-43 和图 4-44 展示了所需添加的元件。我再次把原先放置好的元件画成了灰色。

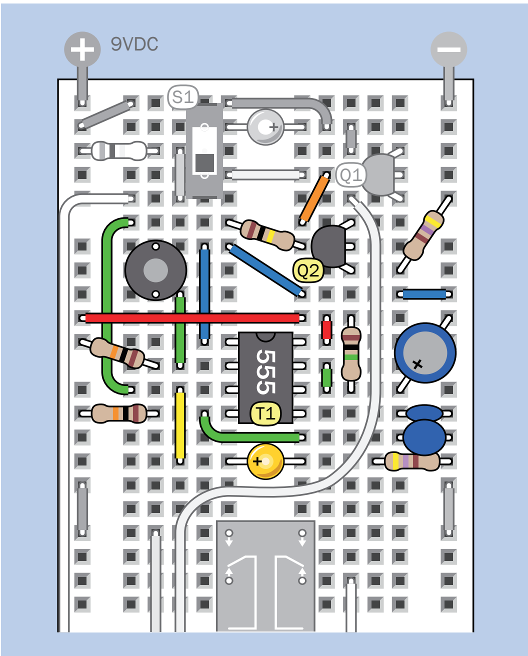


图 4-43　搭建报警器电路的第 3 步（完成）

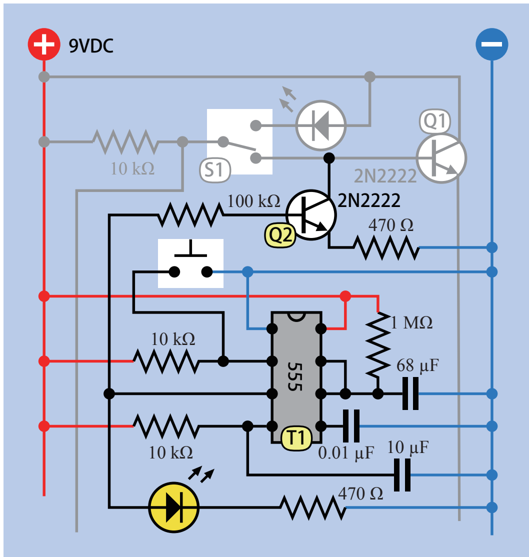


图 4-44　搭建报警器电路的第 3 步电路图

新添加的定时器编号为 T1，它和另一个定时器一样，4 号引脚（重置引脚）上也连接了脉冲抑制电路，因此当你给电路通电时，它不会发出脉冲。按下按钮，按钮把定时器的触发引脚接地，从而触发 T1。

当定时器输出高电压时，电流从 3 号引脚（输出引脚）流出，点亮黄色的 LED，这表明报警系统正在进行倒计时，等待就绪。只要你看见 LED 点亮，报警器就会忽略任何断开传感器开关的操作。

3 号引脚还通过左侧的绿色导线（看起来像一个加长的字母 C）连接到 100 kΩ 的电阻器上，这个电阻器连接到第二个晶体管 Q2 的基极。定时器的输出通过 100 kΩ 的电阻器后，足够使 Q2 导通。Q2 的射极通过 470 Ω 的电阻器接地，而其集电极连接到 Q1 的基极。只要 Q2 导通，它就使 Q1 的基极接地，并阻止 Q1 触发继电器或启动报警器。

以此方式，定时器 T1 阻止报警器启动。当一分钟的宽限期结束时，T1 停止导通，不再下拉第一个晶体管上的电压，报警器就可以启动了——当然，前提是你记住把顶端的开关滑动到非“测试”模式。

现在电路的使用方法如下。

(1) 首先将开关 S1 滑动到“测试”位置，关闭所有的门窗，绿色 LED 点亮。

(2) 将 S1 滑动片向下滑动，报警器就绪。

(3) 按下按钮，然后离开，在黄色 LED 仍然点亮时，关上身后的门。

你搭建的电路具备预定的功能吗？只要你仔细过接线，它就应该能满足要求。定时器 T1 应该在任何情况下都能点亮黄色的 LED，使电路容易测试。你也可以用万用表表笔接触 Q1 的基极，验证电压是否相对较高或较低。只要电压相对较低，报警器就不会触发。当电压升高时，报警器触发。

不要忘记把 68 μF 的电容器连入电路，安装在继电器下方。它用来在报警器就绪时，再次激活延时定时器。

图 4-45 展示了完整的面包板电路，图 4-46 标明了各元件取值，图 4-47 画出了等效电路图。

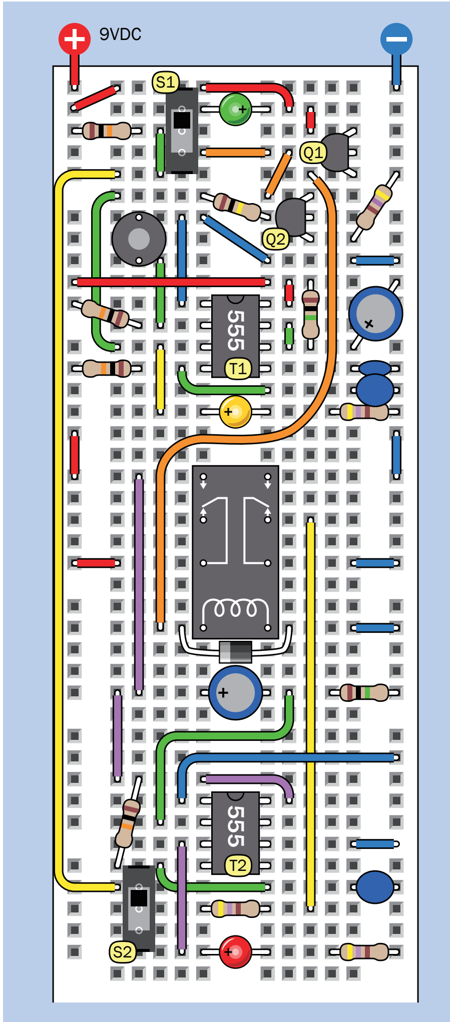


图 4-45　完整报警器电路的面包板布局

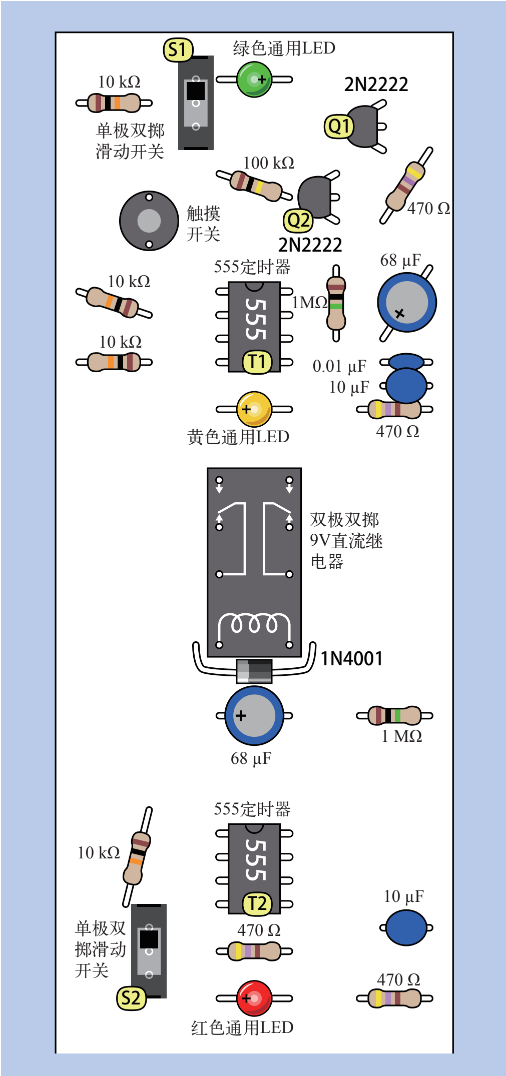


图 4-46　面包板电路的元件取值

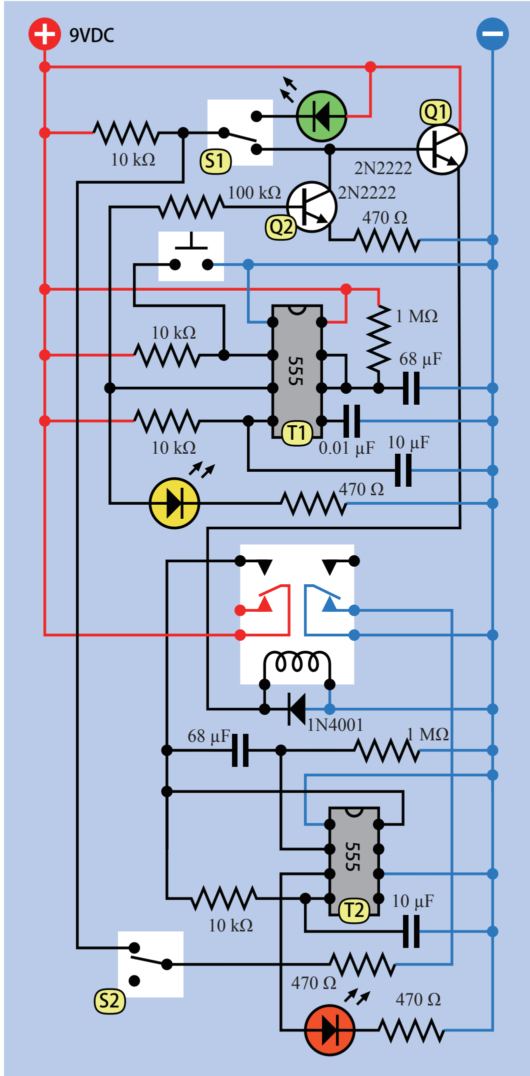


图 4-47　面包板报警器电路的等效电路图

如何发出噪音？

若想让报警器发出噪音，就需要把测试使用的红色 LED 替换为音频电路或器件。

一种简单的实现方式是使用现成的产品。成百上千的警笛售价低廉，只要接通电源就可发出警报声。它们的额定电压多为 12 V 直流，但在 9 V 直流电压下发出的噪音音量也几乎相同。你只需记住，定时器 T2 的输出电流不大于 150 mA。

如果你更喜欢自己设计警报声，可以搭建如图 4-36 所示的电路。只需用继电器的输出给噪音电路供电，你就可以使用自己的警报声了。

开关如何设置?

测试电路时，你一直通过切断电源来关闭报警器电路。你可以在电路中连入一个开关，但是使用数字密码关闭报警器的方法更佳。

目前我暂时还不能展示数字密码的实现方法，因为要用到的逻辑芯片我们还没有讲解，但是实验 21 将帮你解决这个问题。

收尾工作

现在，因为报警器电路能够实际工作了，所以我要讲一讲如何进行收尾工作，也就是把电路焊接在电路板上，再将电路板安装在盒子中，使整个报警器看起来更美观。虽然本书的主要关注点是电子学，但是给项目收尾也是实际制造经验的重要组成部分，因此我要给出一些建议。

电路焊接比实验 14 中的点对点焊接更简单。你可以把元件安装在背面有铜印制线，而且布局与面包板内部相同的多孔板上。只需将每个元件移动到对应的位置上，再焊接到下方的铜印制线上即可，线对线焊接不是必需的。

关于多孔板的搜索和购买，请参考本书第 6 章的耗材一节。

下面是操作方法。

把元件的位置在面包板上仔细标记好，然后把它移动到多孔板上的对应位置，让元件的引脚穿过小孔。

把多孔板翻过来，确认它的稳定性，并检查引脚穿过的小孔，如图 4-48 所示，图中展示了多孔板的背面（元件在另一侧）。铜印制线围绕小孔一周，在小孔之间连线。你的任务是熔化焊料，使其连接铜印制线和元件引脚，在它们之间形成牢固、可靠的连接。

用夹子夹住多孔板，或者把它放在不易滑动的平面上。一只手拿着低功率烙铁，另一只手拿着焊料，用烙铁尖顶住元件引脚和铜印制线，把细焊丝添加到

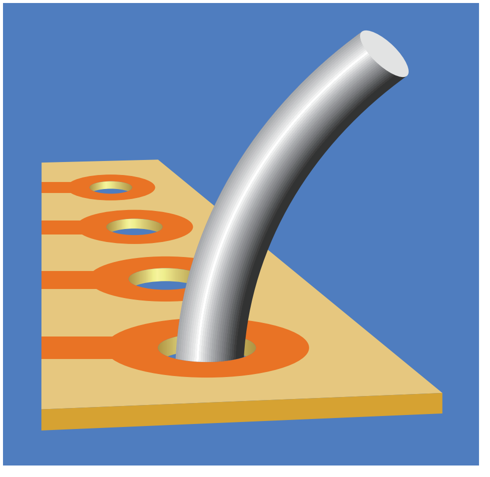


图 4-48　多孔板背面，有引脚穿过

它们的交叉点上。经过 2~4 秒，熔化的焊料开始流动。

让足够的焊料形成圆形的凸起，密封住引脚和印制线，如图 4-49 所示。等待焊料完全硬化，然后用尖嘴钳夹住引脚来回摆动，以确认连接是否紧固。如果一切都令人满意，就用剪线钳剪去突出的引脚，如图 4-50 所示。

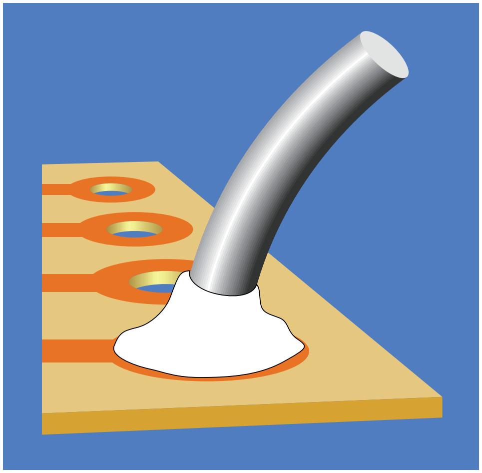


图 4-49　理想的焊接点应当如图所示

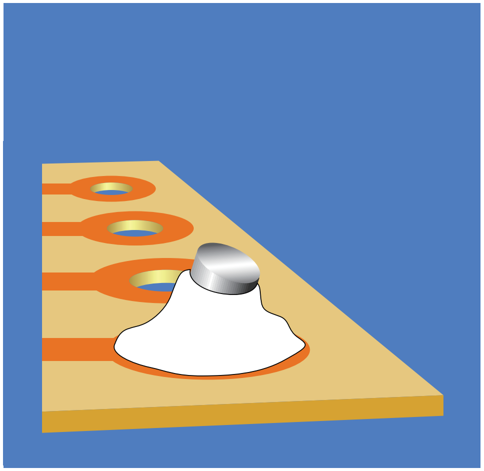


图 4-50　焊料冷却硬化后，剪去突出的引脚

因为焊接点难以拍照，所以我用绘制的图像来表现引脚在好的焊接点形成之前和之后的状态。焊料画成纯白色，用黑线描边。

将元件实际焊接到多孔板上的过程如图 4-51 和图 4-52 所示。

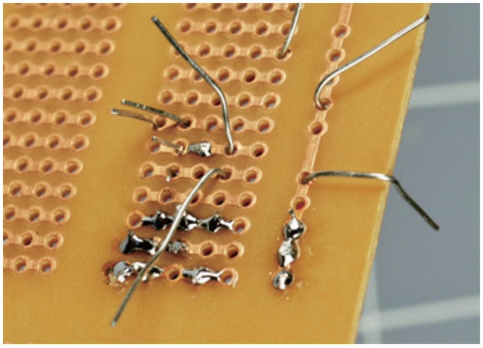


图 4-51　此照片摄于将元件从面包板转移到多孔板的过程中。每次从多孔板的另一面插入两三个元件，元件的引脚弯曲，防止它们掉落

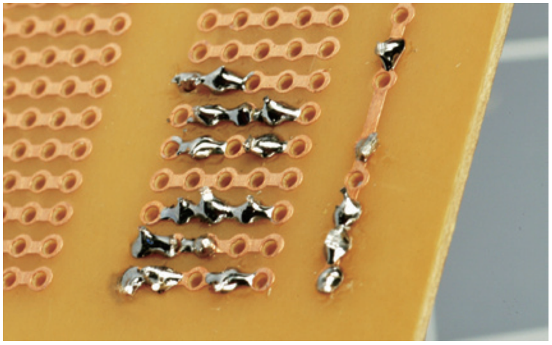


图 4-52　焊接后，突出的引脚被剪短，用放大镜检查焊接点。现在可以再插入两三个元件，重复焊接过程

多孔板最容易出现的错误

1. 焊料过多。在你意识到这一点之前，焊料就会穿过电路板，碰到下一根铜印制线，附着在上面，如图 4-53 所示。当这种情况发生时，你可以尝试用吸焊设备吸收焊料，或者用小刀刮除。我个人比较喜欢用刀刮，如果用橡胶球或吸焊线进行清理，会有一些焊料遗留。

就连非常微小的一滴焊料也足够造成短路。用放大镜检查接线，同时转动多孔板，这样光线就能从不同的角度照射焊接点了。

2. 焊料不足。如果焊接点处的焊料不足，待焊接点冷却后，引脚可能会破坏焊料，甚至非常小的裂缝也能让电路停止工作。在极端情况下，焊料粘在引脚上，也粘在引脚周围的铜印制线上，但就是不在引脚和印制线之间形成连接，结果就是引脚被焊料环绕，却不与焊料接触，如图 4-54 所示。不用放大镜仔细观察的话，这个问题很难发现。

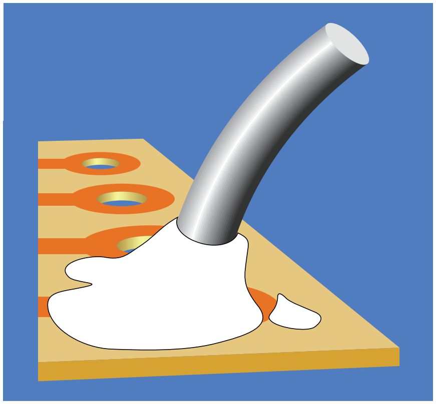


图 4-53 使用焊料过多，容易流到不需要的地方

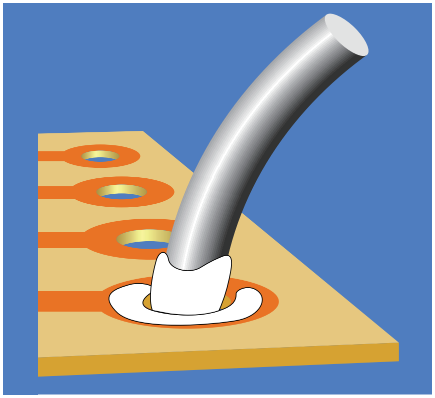


图 4-54 焊料太少（或热量不足）会使焊接后的引脚仍然与多孔板上的铜印制线分离，发丝一样细的裂缝也足以断开电路连接

你可以向可能焊料不足的焊接点添加焊料，但是一定要彻底重新加热焊接点。

3. 元件位置不正确。我们很容易把元件安装在预定位置旁边的小孔中，也很容易忘记连接元件。

我建议你印一份电路图，每次在多孔板上连好一条线路后，就用荧光笔在电路图上划去这条接线。

4. 有碎屑。修剪导线时，剪下来的小导线段不会消失。它们会弄乱你的工作区，也很容易卡在多孔板下面，在不需要的地方形成电学连接。

在给电路通电之前，用旧牙刷清理一下电路板的背面，把牙刷头在外用酒精中蘸一蘸，清除残留的助焊剂。请尽可能保持工作区域的清洁，你越小心，以后遇到的问题就越少。

再次提醒你，一定要用放大镜检查每个焊接点。

基础知识：多孔板故障追踪

如果在面包板上能正常工作的电路焊接到多孔板上之后不能工作，你的故障追踪程序就与我前面概述的略有不同。

首先检查一下元件位置，因为位置最容易确认。

如果所有的元件位置都正确，就轻轻弯曲电路板，同时接通电源。如果电路发出断断续续的响应，你就可以基本确定焊料没有在应有的位置形成连接，或者有的焊接点存在小裂缝。

将万用表的黑色表笔固定在电源负极上，然后接通电源，用红色表笔从上至下检查电路的每个焊接点上的电压，同时继续弯曲电路板。大多数电路中，几乎每部分电路都至少能检测到一些电压。如果有的区域测得电压为零，或者万用表的响应断断续续，你就可以瞄准一个有问题的连接点，虽然它表面看起来可能很完美。

一盏明亮的台灯和一把放大镜对此过程必不可少。一条 1/1000 英寸宽或更窄的小裂缝已经足够阻碍电路的正常工作，但是如果没有放大镜，要发现裂缝就很困难，而且有时甚至也要求灯的亮度完全合适。

尘土、水或油脂都会阻碍焊料附着在导线或铜印制线上，这也是要求你尽量养成仔细小心的工作习惯的另一个原因。

项目盒

封装多孔板的最简单方式就是把它放在项目盒里（我在第 3 章的购物清单中提到了它）。可用的项目盒有上百种，铝盒看起来又精美又专业，但是你需要保护电路板，使它在盒子内部不会短路。塑料盒更便携，也更便宜。

为了使一切看起来更专业，不要一上来就在盒子上武断地给开关和 LED 钻孔。你应该在纸上画好布局（或者用软件绘图，然后把图像印在纸上）。你只需确保有足够的空间供元件组装在一起，并且使元件的排布方式与电路图相似，最小化发生混乱的风险。

把简图贴在项目盒顶盖内侧，如图 4-55 所示，然后用锐利的工具（例如锥子或针）穿过纸面，在塑料板上标记每个孔中心的位置。这些刻痕将帮助你在钻孔时确定钻头的中心。



图 4-55　为开关、LED 和其他元件绘制的电路布局贴在了项目盒顶盖下面。用锥子穿过纸面，标记了盖子上每个待钻孔的中心

如果使用音频电路驱动扬声器（而不是现成的警笛），你就需要在盒子的顶板上钻出多个孔，释放扬声器的声音。我制作的顶板如图 4-56 所示。

我将所有的开关和 LED 安装在顶板上，电源输入插座安装在盒子的一端。当然，每个孔的尺寸都要适合各自的元件，如果你有游标卡尺，可以用它进行测量，选择合适的钻头。要不，你就尽情猜测一下，钻孔太小总比钻孔太大要好。去毛刺工具可以略微扩大钻孔，使元件能够舒适地嵌入。如果你为直径 5 mm 的 LED 钻了直径为 3/16 英寸的孔，就一定要用到去毛刺工具。稍微扩大每一个钻孔，LED 就能舒适地嵌入其中。

如果扬声器缺少安装孔，你将不得不把它粘到盒子上。我使用即干型环氧树脂进行粘贴，但是请注意不要使用太多。你可不希望胶水粘到扬声器纸盒上。

在项目盒薄而软的塑料表面上钻出大孔比较困难。钻头很容易深入下方，造成一片狼藉。你可以利用以下三种方法解决这个问题。

- ❒ 如果有平底钻头，请使用它，它的钻孔非常整齐。你也可以使用孔锯。
- ❒ 钻出一系列直径逐渐增大的孔。
- ❒ 钻出一个较小的孔，用去毛刺工具扩大。

无论采用哪种方法，你都需要将项目盒顶板的外表面向下放在一个小木块上，将它们夹在一起，然后从内侧钻进，这样钻头就会穿过塑料，钻进木块里。

最后，把元件安装在顶板上，如图 4-57 所示，然后把注意力转向盒子的下半部分。

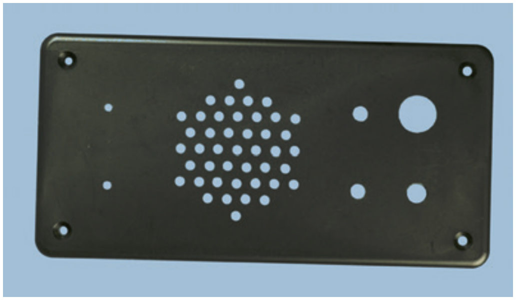


图 4-56　钻孔后的顶板外观。如果仔细标记小孔，一把无线手持小电钻就能钻出整齐的小孔



图 4-57　元件安装到了项目盒的控制面板上（从下方看去）。扬声器粘贴到了自己的位置上，多余的胶水粘到了 LED 上，以防万一

焊接开关

第 1 步是决定开关的安装方向。使用万用表找出当开关滑动时，它的哪些接线柱是连接的。你

可能希望滑动片向上滑动时开关接通。我的控制面板的下表面如图 4-57 所示。我使用了双极双掷开关，因为我恰巧有一个。对于这个项目，只需单极单掷开关就足够了。

请记住，一般来说，双掷开关的中央接线柱就是开关的极。

用绞线连接电路板和顶板上的元件比较合适，因为绞线容易弯曲，对焊接点的压力较小。把每对导线拧在一起有助于减少混乱。

当你把导线或元件与开关的接线片相连接时，小功率烙铁提供的热量可能不足以形成良好的焊接点。这种情况下，你可以使用大功率烙铁，但是一定要用良好的散热器保护 LED，也不要让烙铁与任何地方的接触时间超过 10 秒钟，因为烙铁会很快熔化绝缘层，甚至有可能损坏开关的内部元件。

在更复杂的项目中，用更整洁的方式连接顶板和电路板不失为一种好方法。彩色带状电缆是理想的实现工具，它的插头–插座连接器安装在电路板上。但是本实验为入门级实验，我就暂不使用了。导线向各方探出，如图 4-58 所示。

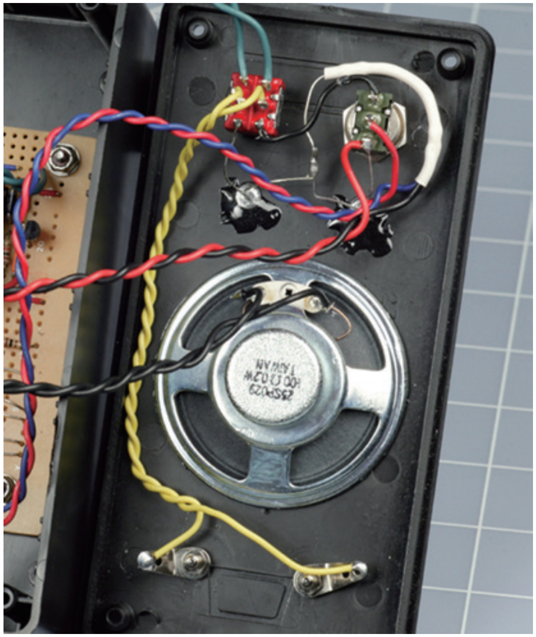


图 4-58　双绞线进行点对点连接，不太考虑整洁性，因为这个项目比较小

固定电路板

电路板将安装在项目盒底部，用四枚 4 号机械螺钉（螺栓）、垫圈和尼龙防松螺母固定。我更喜欢用螺栓和螺母而非胶水固定电路板，方便移动电路进行修理。你需要使用防松螺母来降低螺母松动、掉落在元件之间的风险，因为这样可能引起短路。

你需要切割多孔板，使它适应盒子的大小，注意不要损坏上面的任何元件。我使用环形锯切割，但是钢锯也可以。请记住，多孔板通常含有玻璃纤维，可能会使木锯变钝。

切割完毕后，检查电路板背面是否有松动的铜印制线碎片。

在电路板上钻出螺栓孔，再次注意不要损坏任何元件。然后通过钻孔在塑料盒底部做记号，再根据记号钻孔。钻孔要打成埋头孔（即，使孔的边缘成斜角，这样安装平头螺钉后，就会与周围的表面平齐），从下面插入小螺栓，安装电路板。因为你使用的是防松螺母，并不会松动，所以不需使它们特别紧固，甚至必须避免过紧。

安装好电路板后，再次测试电路，以防万一。

注意：避免电路板受力

一定要非常小心，不要使电路板和项目盒连接过紧，这可能会引起电路板弯曲受压，从而使电路板上的连接点或铜印制线断裂。

最终测试

电路完成后，如果你还没有布置好磁传感器开关网络，就可以用一段导线代替。为了方便，我在盒子上安装了一对接线柱。你也可以从电路板上引出一对导线，穿过盒盖上的小孔。

如果电路一切工作正常，现在就可以用螺钉固定盒盖，把导线装入盒内了。因为你的盒子比较大，所以应该没有金属部件意外碰撞的风险，但是你也应当小心从事。完成的产品如图 4-59 所示。



图 4-59　报警器盒成品

安装报警器

若想用磁传感器开关完成本项目，那就应该对每个开关进行测试，来回移动磁力模块，使其接近或远离开关模块，同时使用万用表测试开关接线柱之间的连接情况。当开关靠近磁铁时，它应当闭合，而当磁铁移开时，它应当断开。

现在画一幅开关连接图，一定要记住：开关必须串联，不能并联！图 4-60 展示了理论上的概念图。两根接线柱是控制盒上的接线柱（画成了绿色），而深红色的长方形是门窗上的磁传感器开关。由于这种装置的接线通常要用到双导体导线，所以你可以按照我讲解的方法布线，但是要进行切割和焊接，以形成分支。焊接点画成了橘黄色。请注意电流在流回控制盒之前，是如何通过所有的串联开关的。

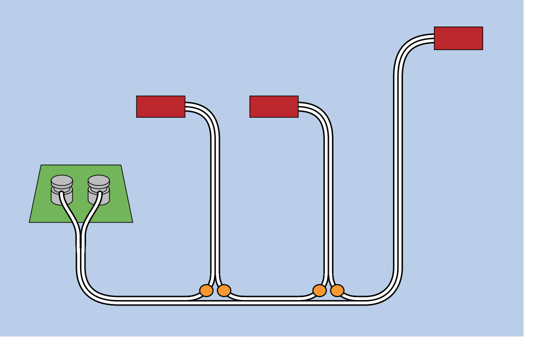


图 4-60　可以使用双导体、带白色绝缘层的导线连接报警器控制盒上的接线柱和磁传感器（深红色）。因为传感器必须串联，所以在画有橘黄色小点的地方将导线切割和连接

图 4-61 展示了在有两扇窗、一扇门的情况下电路网络的安装方法。蓝色的长方形是磁力模块，它们激活开关模块。

很明显，你要用到大量的导线。门铃和电炉恒温器常用的白色双绞线就很好，尺寸一般为 20 线规或更大。

所有的开关安装好以后，把万用表表笔夹到与报警器盒子相连的导线上，将万用表设置为测量连续性，每次打开一扇门或窗，检测是否断开了电路。如果一切正常，就把报警器导线连接到项目盒的接线柱上。

下面解决电源的问题。使用交流适配器，输出设置为 9 V，与项目盒的直流电源插头相连接，或者把电源插头连接到 9 V 的电池上。电路在 12 V 报警器电池的电压下也能正常工作，但是继电器需要替换成我指定的 12 V 继电器。

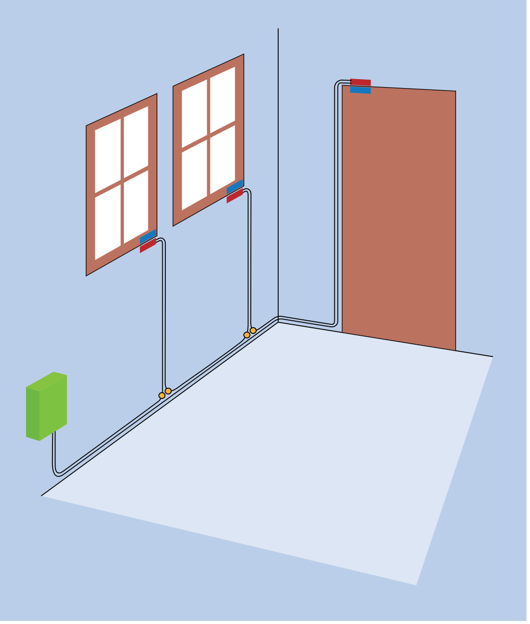


图 4-61　在有两扇窗、一扇门的装置中，传感器的磁性元件（蓝色）可以如图放置，而开关（深红色）安装在它们旁边

剩下的任务就是给报警器盒上的开关、按钮、电源插座和接线柱贴标签。你知道报警器出入连续性测试模式由开关控制，而按钮让你在系统开始警报之前有一分钟的撤离时间，但是别人都不知道这些功能，你可能也想允许客人在你外出的时候使用报警系统。就此而言，数月或数年后，你自己可能也会忘记一些细节。

总结

报警器实验带领你熟悉了电路开发在一般情况下的基本步骤。

- ❒ 列出愿望清单。
- ❒ 确定合适的元件类型。
- ❒ 绘制电路图并理解。
- ❒ 修改电路图，使其适合面包板上的导体布局。
- ❒ 在面包板上安装元件，测试基本功能。
- ❒ 修饰或增强电路，并重新测试。
- ❒ 把电路转移到多孔板上，测试，如果必要，进行故障追踪。
- ❒ 添加开关、按钮、电源插座和插头，使电路与外界连接。

- ❒ 把整个电路安装在项目盒中（并添加标签）。

实验 19：反应速度测试器

因为 555 定时器的运行速度为每秒数千个周期，所以你可以使用它测量人的反应速度。你可以与朋友比赛，看谁的反应速度最快，也可以测量自己的反应速度，看这个数字如何随情绪、时刻和睡眠时长变化。

电路的概念并不难理解，但是它需要大量的接线，也只能安装在有 60 排（或更多）小孔的面包板上。但是，电路也可以分块测试，就像实验 18 中的电路一样。如果你小心仔细，避免出错，整个项目能在几个小时内完成。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 4026B 芯片 3 枚
- ❒ 555 定时器 3 个
- ❒ 电阻器：470 Ω 2 个、680 Ω 3 个、10 kΩ 6 个、47 kΩ 1 个、100 kΩ 1 个、330 kΩ 1 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 2 个、0.047 μF 1 个、0.1 μF 1 个、3.3 μF 1 个、22 μF 1 个、100 μF 1 个
- ❒ 触摸开关 3 个
- ❒ 通用 LED：红色 1 个、黄色 1 个
- ❒ 20 kΩ 或 25 kΩ 微调电位器 1 个
- ❒ 单数位数字 LED 显示器，高度 0.56 英寸，最好为低电流类型，显示红色数字，能够在 2 V 正向电压和 5 mA 正向电流下工作（推荐型号：Avago HDSP-513A、Lite-On LTS-546AWC、Kingbright SC56-11EWA，等等）。

注意：保护芯片免受静电损害

555 定时器不易损坏，但在本实验中，你将使用 CMOS 芯片（4026B 计数器），它更容易因静电荷受损。

芯片是否容易在使用中损坏，取决于几个因素，例如你所在位置的湿度、你所穿鞋的类型，以及工作区域的地板类型。有些人似乎比别人更容易积累静电荷，我无法也解释这个现象。我自己从未因静电而损坏过芯片，但是我认识的一些人出现过这种情况。

如果身上容易积累静电，你自己大概也知道这一点，因为当你接近金属门把手或钢制水龙头时，

会遭到轻微的电击。如果你感觉确有必要保护芯片免受静电损害，那么最彻底的预防方法是将自己接地。最佳方法是佩戴防静电手环，导电手环用尼龙搭扣固定在手腕上，通过高阻值电阻器（一般为 1 MΩ）连接到弹簧夹上，再固定到较大的金属物体上。

邮寄来的芯片通常用导电塑料管包装，或者把引脚插入导电泡沫中。塑料管和泡沫保护芯片，确保所有的引脚电势基本相等。如果你想重新包装芯片，却没有导电泡沫，可以把芯片的引脚插入铝箔中。

注意：接地时要小心

如果你不慎用一只手触摸到较高的电压，另一只手佩戴的防静电手环上的电阻器能保护你免于触电身亡。这个特点很重要，因为从一只手流向另一只手的电击会通过胸腔，使心跳骤停。

如果你只用一段普通的导线给自己接地，就失去了这种保护措施。合适的手环虽然会增加一点花费，却是非常明智的投资。

现在，让我们回到实验上来。

快速演示

在本书的第 1 版中，我曾建议使用单个的三数字显示器，而在这一版中，我换成了三个独立的显示器。虽然成本略微有所上升，但是接线方法简便多了，电路也可以搭建得更简单。我还相信，单个的 LED 数字显示器在以后的许多年间都可以买到。

我指定了高为 0.56 英寸的数字显示器，因为这是工业标准尺寸，引脚分配也符合标准。如果使用较小的显示器，引脚分配就会不同，而如果使用较大的显示器，则不会与面包板上的其他元件相配合。

让我们先熟悉一下其中一个数字显示器和驱动它的 4026B 芯片。

电路的第一个模型如图 4-62 所示。（如果你感觉电路图更易理解，请参考图 4-63，其中的元件都相同。）

图 4-64 展示了各元件的取值。

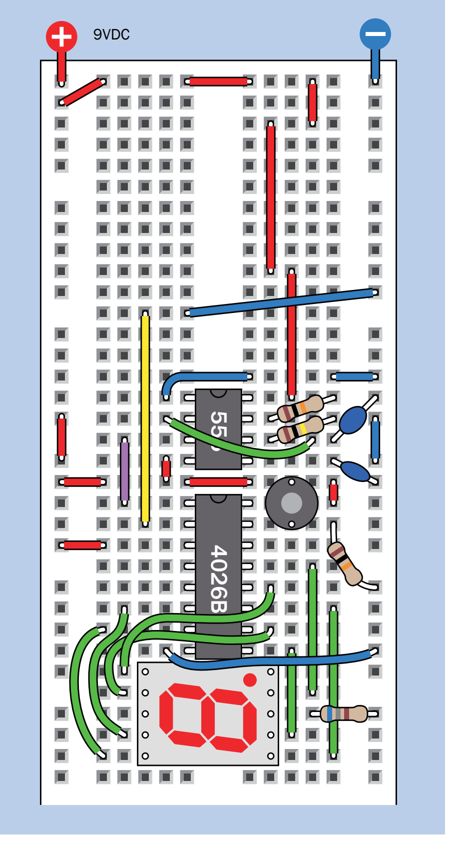


图 4-62　反应速度测试器的第一个模型展示了定时器如何驱动给单数字 LED 显示器供电的计数器芯片

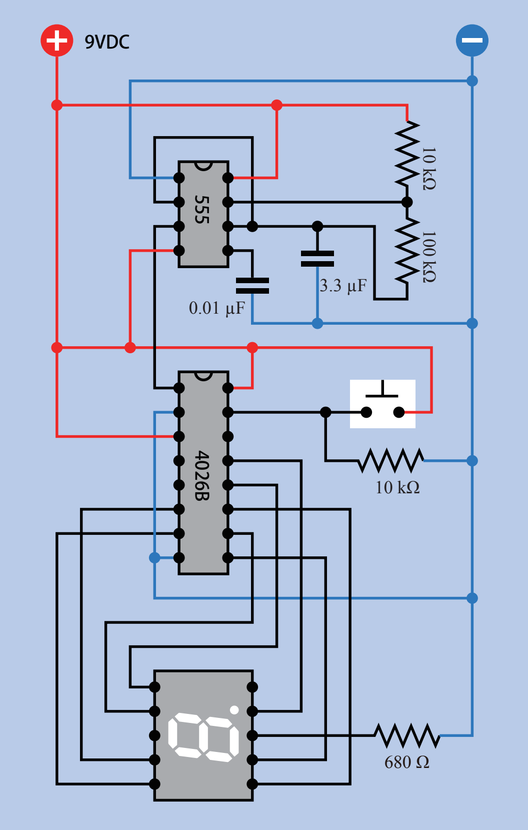


图 4-63　第一个电路模型的电路图

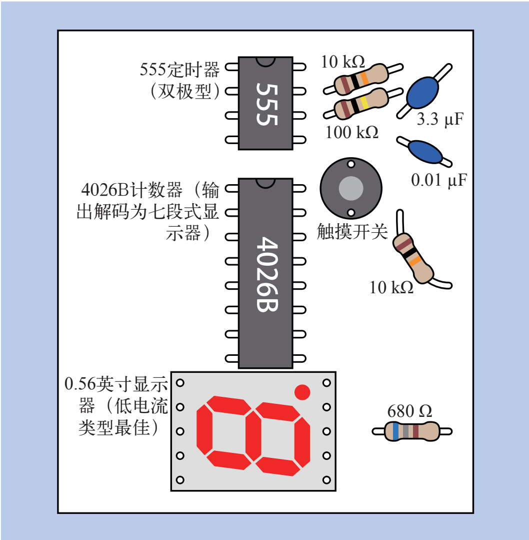


图 4-64　第一个电路模型的元件取值

你还要向电路板上添加更多的元件（实际上，到电路完成时，电路板将完全挤满），所以你需要严格按照我在图中展示的位置放置元件。请仔细数一数小孔的排数！你目前还看不出一些导线的作用（所有的红色导线——它们是干什么的），但是它们将允许你向电路中添加并激活更多的 555 定时器。

用 9 V 电池或交流适配器给电路供电，你将会看到数字显示器重复顺序显示 0~9 的所有数字。

如果看不到任何数字，就将万用表设置为测量直流电压，把黑色表笔固定在电源的负极上，用红色表笔测量电路关键位置的电压，例如芯片的电压输入引脚。如果电压看起来比较正常，请确认右下角的电阻器阻值为 680 Ω（而非 68 kΩ 或 680 kΩ，它们的颜色很相似）。

如果显示器不能完整显示数字，或者数字没有按照顺序显示，那么应该是与 4026B 芯片连接的绿色导线出现了错误。

如果显示器显示数字 0 且保持不变，说明 555 定时器接线错误，或者定时器与 4026B 芯片之间的连接有误。

当观察到显示的数字逐渐增大时，保持触摸开关闭合，你会发现它使计数器跳回到 0。一松开触摸开关，数字就又开始逐渐增大了。

现在，我们有了反应速度测试器的基础，只需再加入几个数字显示器，提高计数速度，进行一些改进即可。但是，我首先要解释发生的一切。

基础知识：LED 显示器

LED 这一术语略为混乱，你在前面实验中使用的 LED 元件（一个小小的圆形元件，底部伸出两根长引脚），正确名称是标准 LED、通孔 LED 或 LED 指示灯。它们的应用非常普遍，人们开始用简称 LED 指代它们。但是 LED 也用于称呼其他元件，例如现在插入面包板的数字显示器，它的正确名称是 LED 显示器，更确切地说，它是七段式单数字 LED 显示器。

图 4-65 展示了显示器的尺寸，以及显示器下方的引脚位置。注意，数字显示部分确实由七段构成，还有一个小数点。引脚间距是 0.1 英寸的倍数，对于面包板安装很有帮助。

现在请观察图 4-66。图中展示了引脚和显示段间的内部连接。请注意，3 号和 8 号引脚的中心为蓝色，这表示它们应当连接接地负极。其他所有引脚都被设计为接收高电压，以激活 LED 显示段。这种显示器叫作共阴极显示器，因为其内部二极管的阴极都连接在一起。

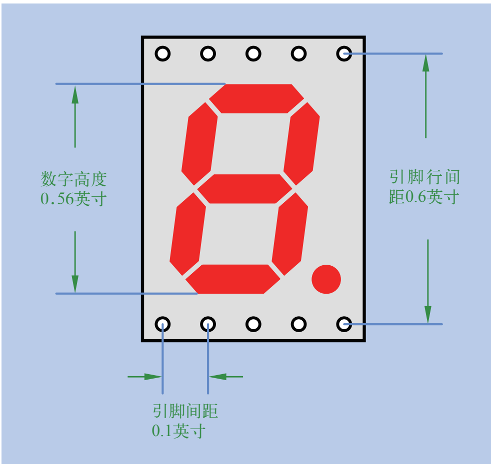


图 4-65　标准 0.56 英寸七段式 LED 显示器的尺寸和引脚位置

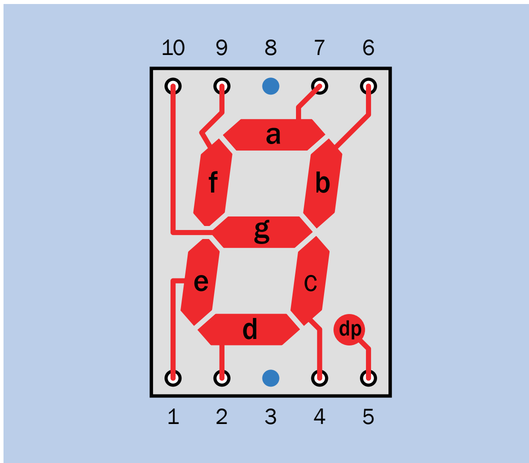


图 4-66　用于引脚编号的电路图，内部连接方式隐藏在元件内

在共阳极显示器中，情况相反，LED 显示段由低电压激活，它们的内部连接共享高电压。你可以选择电路适合的显示器类型，但共阴极显示器的应用更广泛。

请注意，显示段用小写字母 a 至 g 标明，dp 代表小数点。这种表示方式几乎在所有数据表上通用（但是有的数据表用 h 表示小数点）。

目前为止一切顺利，但是我遗漏了一个重要的信息：与所有的 LED 类似，数字显示器的各段必须用串联电阻器保护。这非常麻烦，你可能想知道为何生产商不把电阻器放到显示器内部。答案是：显示器必须在多种电压下可用，而电阻器的阻值大小将取决于电压的大小。

那么，为什么我们不能让所有的显示段共享一个电阻器，把它连在 3 号引脚和接地负极之间呢？实际上我们可以这样做，但是这样电阻器就将使电压下降并限制流经显示段的电流，受影响的显示段数目取决于显示的数字是多少。数字 1 只需点亮两个显示段，而数字 8 点亮所有的显示段，因此有些数字会比其他的数字亮。

这一点真的很重要吗？我认为对实验演示而言，简洁应该比完美更重要。如果你看一看图 4-62，就会发现右下角实际上只有一个 680 Ω 的电阻器，位于 LED 显示器和负极总线之间。这个程序并不正确，但是本实验要安装 3 个七段式显示器，这样你只需连接 3 个外接电阻器而非 21 个，你一定很高兴。

基础知识：计数器

4026B 芯片是十进制计数器，因为它以十进制计数。大多数计数器都有编码输出，它们以二进制编码格式输出数字（我将在后面的实验中加以解释）。但是 4026B 芯片的工作原理不同，它有七根输出引脚，引脚的供电方式恰巧对应七段式显示器。其他计数器需要用驱动器把二进制输出转换为七段式显示，而 4026B 芯片这一个封装内应有尽有。

4026B 芯片使用起来非常方便，只是它作为 CMOS 芯片已经过时，并且功率有限。数据表建议用 9V 电压供电时，从任何引脚输出的电流都不要超过 5 mA。

理想情况下，计数器的输出应当通过一列晶体管放大。为了满足此目的，你可以购买内含七对晶体管的芯片，称为达林顿晶体管阵列。（如果想显示小数点又该怎么办呢？没问题，可以另买一个内含八对晶体管的达林顿晶体管阵列。）

本实验中，我本可以使用三个达林顿晶体管阵列芯片驱动三个 LED 显示器，但这样会增加电路的复杂度，提高成本，而且需要用两块面包板。因此我决定使用低电流 LED 显示器，它可以直接由计数器驱动。它的亮度不如普通的 LED 显示器，但是也可以满足要求。我选择了 680 Ω 的电阻器，因为它能够限制计数器芯片上所以引脚的电流，使其小于 5 mA，并在 LED 两端形成约 2 V 的压降（随点亮的显示段个数而变化）。

现在我要介绍 4026B 芯片的内部工作原理。计数器芯片通常内置一些有用的特性。请观察图

4-67，图中展示了芯片的引脚分配。标记为“连接显示段 *X*”的引脚容易理解，只需从每个引脚引出导线，连接到 LED 显示器的对应引脚上。观察图 4-62，你会发现每根绿色导线连接计数器的输出引脚和显示器的输入引脚。

芯片的 8 号和 16 号引脚分别连接接地负极和电源正极。几乎所有的数字芯片都以此方式向对角供电（555 定时器除外，但是实际上它是模拟芯片）。

因为图 4-67 包含你可能不需要的信息，仅供日后参考，所以我在图 4-68 中绘制了计数器和显示器的简化视图，忽略了用不到的引脚，展示了计数器输出引脚和显示器引脚的关系。

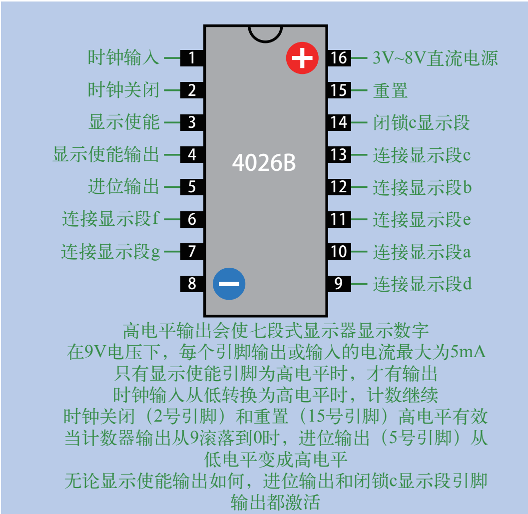


图 4-67　4026B 计数器芯片的引脚分配，输出译码能驱动七段式单数字 LED 显示器

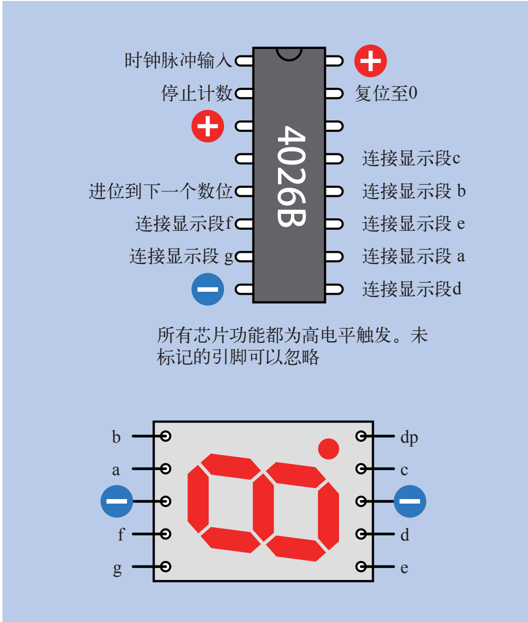


图 4-68　计数器芯片和显示器的简化视图，按照面包板布局绘制

请观察 15 号引脚（重置引脚）和图 4-62。图中的按钮开关（触摸开关）在按下按钮时，能够向 15 号引脚施加正向电压。（电压通过我前面提及的红色导线，穿过电路板到达按钮开关。）

在按钮未按下时，计数器的重置引脚上不施加正向电压。但是，10 kΩ 的电阻器将 15 号引脚与面包板的负极总线永久相连，它叫**下拉电阻器**。它把引脚上的电压下拉到接近于零，直到你按下按钮为止，此时高电压输入压制通过电阻器输入的低电压。请记住，如果不向数字芯片的每个输入引脚施加确定的电压，得到的结果就将是随机的，会十分混乱。我曾经提到过这个问题，但是此处我要再次强调，因为这是错误的常见源头。

- ❐ 为了使输入引脚保持高电压，将它通过 10 kΩ 电阻器连接到正极总线上（至少对于本书的电路而言）。当你需要拉低电压时，可以使用开关或其他器件，越过电阻器，与负极总线形成更直接的连接。
- ❐ 为了使输入引脚保持低电压，将它通过 10 kΩ 电阻器连接到负极总线上。当你需要拉高电压时，可以使用开关或其他器件，越过电阻器，与正极总线形成更直接的连接。
- ❐ 计数器芯片上的所有输入引脚必须形成连接，不要让任何引脚悬空！
- ❐ 不用的输出引脚不应连接。

还有一点需要注意。有时，芯片具有多余的输入引脚，例如 4026B 芯片的 3 号引脚为显示使能输入引脚。我希望显示器始终处于使能状态，因此我将 3 号引脚直接连接到正极总线上，以后就不需过问了。

即便你用不到输入引脚，它的状态也必须明确。你可以把它直接连接到电源的正负极。

现在我要简述一下 4026B 芯片的其他特性。

时钟输入（1 号引脚）接收一连串高低电平脉冲。芯片并不在意脉冲的长短，每次感知到输入电压从低转高时，计数加 1。

时钟关闭（2 号引脚）告知计数器阻塞时钟输入。与芯片上的其他引脚类似，该引脚为高电平有效，即在高电平下才能实现功能。在面包板上，我用蓝色和黄色的导线使 2 号引脚保持为低电压，也就是说，我关闭了时钟关闭引脚。这样表述有些混乱，所以我要总结一下。

- ❐ 当时钟关闭引脚接高电平时，它会使计数器停止计数。
- ❐ 当时钟关闭引脚被下拉至接地负极时，它允许计数器计数。

显示使能（3 号引脚）已经有所提及。

显示使能输出（4 号引脚）此处暂不使用。它与 3 号引脚相连，与其状态相同，这样你就可以把该状态传递到其他 4026B 定时器上。

进位输出（5 号引脚）对于 9 以上数字的计数不可或缺。当计数器计到 9，再滚动回 0 时，引脚电压从低变高。取该引脚的输出，连接到第二个 4026B 计数器的时钟输入引脚上，第二个计数器将计算十位数字。你可以接着用它的进位输出引脚作为第三个计数器的时钟信号，第三个计数器将计算百位数字。我将在本实验的最后部分利用这个特性。

最后，计过 0、1 和 2 这几个数字后，可以用 14 号引脚重启计数器。这一功能对于计时 12 小时的数字时钟很有用，却与我们的项目不相关。14 号引脚是输出引脚，不会用到，所以我们可以不连接它。

这些特性可能看起来很混乱，但是遇到从未接触过的计数器芯片，仔细阅读生产商的数据表（如果你足够细心，逻辑性强），也可以弄懂。之后，你可以用 LED 和触摸开关对芯片进行测试，以确保没有任何误解。实际上，这就是我自己理解 4026B 芯片性能的方法。

脉冲发生

因为 555 定时器的供电电压范围为 5 V~15 V，与 4026B 芯片相同，所以定时器 3 号引脚上的输出可以直接连接到 4026B 芯片的输入。这就是面包板电路上紫色导线的功能。555 定时器提供脉冲，而 4026B 为脉冲计数。

现在你应该对 555 定时器周围的其他接线很熟悉了，定时器正在非稳态模式下运行，现在唯一的问题是它为何运行得如此缓慢。我们可不能在这么慢的速度下测量人的反应速度。

确实如此，但是对于本次演示而言，我并不想让数字看起来模糊不清。我们将稍后提高电路的运行速度。

制订计划

反应速度测试器应该如何工作呢？以下是我的愿望清单。

(1) 需要一个开始按钮。

(2) 按下开始按钮后，首先是一段延迟，什么也不发生，然后弹出视觉提示，请测试者做出反应。

(3) 同时，计数器从 000 开始计数，间隔为 1/1000 秒。

(4) 测试者需要按下按钮，停止计数。

(5) 计数停止，显示器显示从出现提示到计数停止之间的时间间隔，从而得到测试者的反应速度。

(6) 重置按钮使计数变回 000。

面包板上已经安装了重置按钮，这是必需的，但是在这之前，我们还需要一个按钮用来停止计数程序。

计数器的时钟关闭引脚可以固定显示器的显示数字，但是如果你想保持显示固定，就需要使引脚一直保持高电压，也就是说，该引脚需要锁存。

以上信息表明，我们可以再连接一个 555 定时器，在非稳态模式下工作。

控制系统

图 4-69 添加了双稳态定时器和两个新按钮。移除了图 4-62 中的蓝色对角线导线（给新的定时器腾出空间）。前面安装好的其他部件仍然保持在原位，但是画成了灰色。

图 4-70 展示了新增部分的电路图，图 4-71 展示了新增元件的取值。

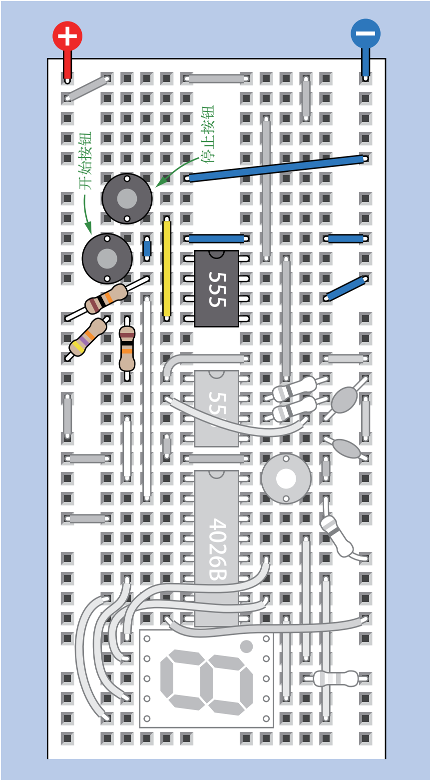


图 4-69　增加双稳态 555 定时器，已连接好的元件画成了灰色

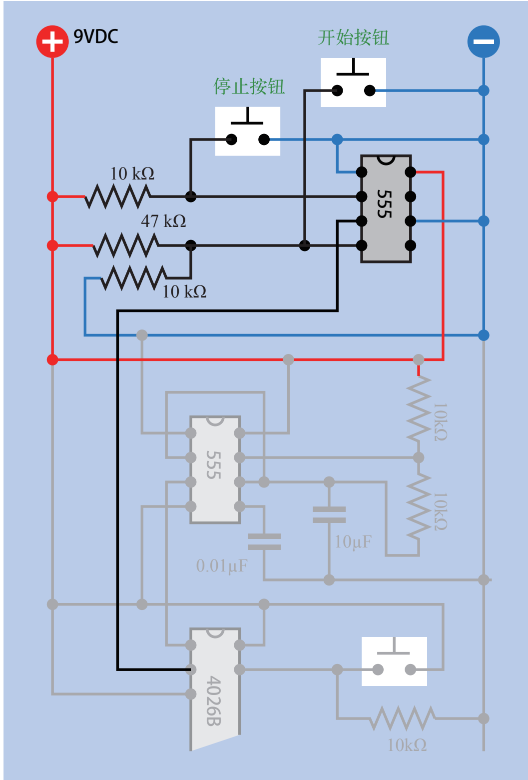


图 4-70　本电路图展示了第二个定时器及其相关元件。已连接好的元件画成了灰色

新的电路部分搭建完成后，就可以测试了。你会发现，两个新添加的按钮控制计数过程的开始和停止。你知道它们是如何工作的吗？

按下开始按钮，它使双稳态定时器的重置引脚接地。3 号引脚上的定时器输出电压被拉低，它连接到计数器的时钟关闭引脚。请记住，时钟关闭引脚的低电平状态意味着计数器未关闭。于是，计数器开始计数，而且将一直继续下去，因为双稳态定时器被触发后，它的输出被锁存，这个过程会持续进行。

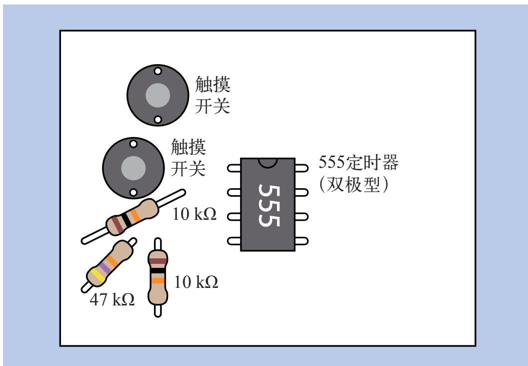


图 4-71　本项目增加的各部件取值

但是你可以停止计数，按下停止按钮即可。这一操作使双稳态定时器的输入引脚接地并触发。因此，定时器的输出变为高电平。而且，因为它在双稳态模式下工作，所以输出被锁存，会无限保持高电平。高电平输出拉高时钟关闭引脚上的电平，从而使计数器停止。

当你按下最初安装的位于电路右下方的按钮时，它仍然能将定时器归零，但是定时器仍然锁存在关闭模式下，直到你按下开始按钮，使它重新启动为止。

双稳态 555 定时器正是本电路运行所必需的芯片。

进度报告

让我们看一看在完成愿望清单的路上走了多远吧，我觉得就快到达终点了。按下一个按钮启动电路，再按下另一个按钮停止电路，当电路停止后，再按下第三个按钮，使计数器清零。

现在唯一缺少的就是惊喜，使用计数器的人一定不能知道计时何时开始，电路设计的目的就是要测试他的反应速度。

为什么不再添加一个单稳态模式的定时器，在开始计时前插入一段延时呢？这样，计时开始的时间就难以预测了。

延时

首先移除开始按钮以及将其与负极总线相连的蓝色对角导线，竖直的黄色导线留在原位。

现在安装一些别的元件，如图 4-72 所示。开始按钮重新安置去触发第三个定时器的输入，该定时器将在开始时插入一段延时。定时器的输出将在 5~10 秒内保持高电平，当它变为低电平时，就会触发双稳态定时器，拉低它的输出，并抑制 4026B 计数器的时钟关闭特性，因此计数器开始计数。

在安装红色和黄色 LED 时一定要小心。红色 LED 的安装方式可能与你预期的相反，因为连接到了电源正极，所以它的长引脚应该朝向底端而非顶端。

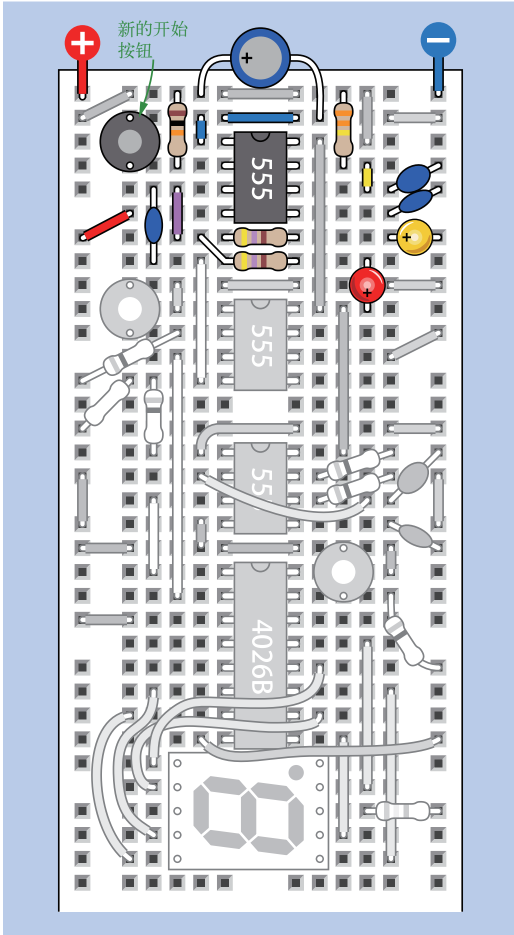


图 4-72　反应速度测试器电路的上半部分已经完成

新添加部分的电路图如图 4-73 所示。

添加到面包板上的元件取值如图 4-74 所示。

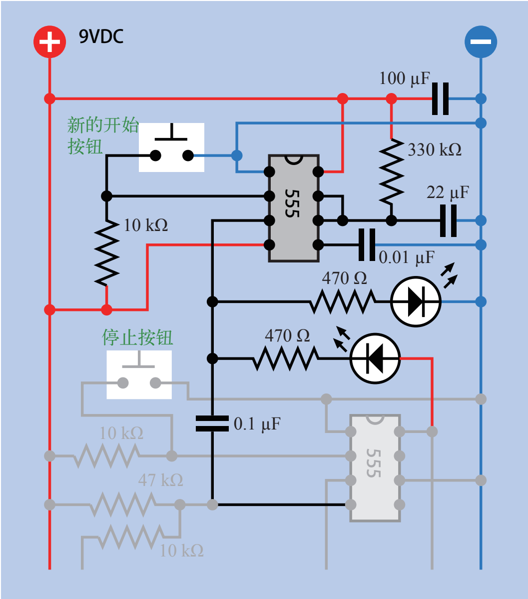


图 4-73　控制电路最后一次新增部分的电路图

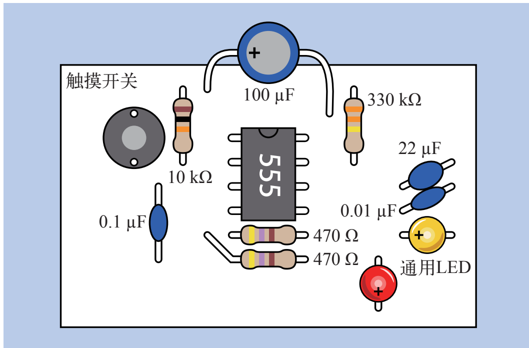


图 4-74　添加到面包板上的各元件取值

测试

电路一通电，不待你发出命令，计数器就会立即开始计数。这虽然很讨厌，但是也容易处理。按下停止按钮，停止计数，然后按下右下方的按钮使计数器清零，现在电路已经准备好，可以开始测试了。

按下新的开始按钮，它提供初始延时，在这段时间内，黄色 LED 点亮。延时持续约七秒钟，延时结束时，黄色 LED 熄灭，红色 LED 点亮，同时计数器开始计数——直到你按下停止按钮为止。

面包板顶端的 100 µF 电容器看起来像个马后炮，实际上却非常重要。555 定时器在开关输出时容易产生尖峰电压，而在此电路中，尖峰电压不会等待延时，直接触发第二个定时器。100 µF 的电容器可以抑制这个不良倾向。

现在，我们已经安装了电路的所有特性，只需要将计数速度到几分之一秒，并添加计数器和显示器。

电路如何工作?

图 4-75 展示了各元件互相连通的方式。

我将自上而下解释这幅图。开始按钮（在顶端，与 3 号定时器连接）将定时器的输入拉低，触发定时器。

3 号定时器的输出将在高电平下持续约 7 秒钟，从而产生初始延时。

延时结束时，3 号定时器的输出电压下降，电压的变化通过 0.1 μF 的耦合电容器传递到 2 号定时器上（双稳态）。电容器只允许很短暂的脉冲到达 2 号定时器的重置引脚上，该脉冲把 2 号定时器的输出拉低。较低的输出进入 4026B 计数器的时钟关闭引脚，使计数器使能，计数开始。

现在我们要等待使用者的响应。使用者按下 2 号定时器上的停止按钮，该按钮与 2 号定时器上的输入引脚相连接。2 号定时器接收到的短暂低电压输入使它的输出升高，使计数器上的时钟关闭引脚使能，从而停止计数。

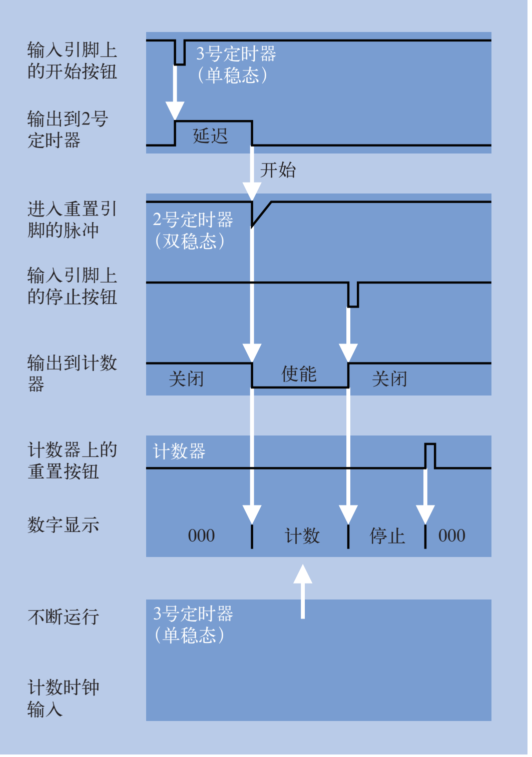


图 4-75　定时器控制电路元件之间的相互作用

背景知识：开发过程中的问题

本实验引发了一个问题。我几年前搭建的原型电路运行良好。*Make:* 杂志的实习生搭建这个电路时，它也运行良好。我们当时并不知道，不同品牌的 555 定时器的重置引脚性能略有不同，而数据表上并未展示。

著作出版数年后，我收到了一位读者的信息，他的电路功能不规律，有时完全无法运行。我重新搭建了电路，将示波器连入电路，发现耦合电容器忠实地从 3 号定时器向 2 号定时器的重置引脚传输脉冲，但是，2 号定时器有时确实不能辨认脉冲。

问题到底出在哪里？或者是脉冲时间太短，或者是脉冲电压不够低。这两种问题的解决方法都是在 2 号定时器的 4 号引脚上加较低的上拉电压，这就是你见到 4 号引脚上连有两个电阻器的原因，它们的功能类似于分压器，使 4 号引脚上的电压略小于 2 V。这个电压足够使电路实现功能，但也允许重置电压下降到更低，使能重置引脚。

现在，我的电路可以正常工作了。我们将在本书出版前再次测试电路。如果你的电路不能正常

工作，就试试向 2 号定时器的 4 号引脚上施加不同的电压，把 47 kΩ 电阻器换成更大或更小的电阻器，也可以尝试使用更大的耦合电容器，然后告知我。我希望本书的所有电路都能一直正常工作，但是我无法预见所有可能影响结果的制造工艺差别。

增添数位

增添两位数字很容易，因为每个显示器都由自己的 4026B 计数器控制，而所有的计数器和显示器连接方式基本相同，如图 4-76 所示。

请注意左侧的紫色导线，每根紫色导线都将一个计数器的进位输出连接到下一个计数器的时钟输入。

右侧的黄色导线将所有计数器的重置输入引脚连接到一起，这样当你重置一个引脚时，所有的引脚都会重置。

在 2 号和 3 号计数器中添加的蓝色导线用于给每个计数器的 2 号引脚接地。请记住，2 号引脚是时钟关闭引脚。2 号和 3 号计数器不用停止计数，因为它们被第一个计数器所控制。第一个计数器停止，它们就都停止了。

不要忘记向 2 号和 3 号计数器的 16 号引脚（功率输入引脚）施加高电压，方法是在每个芯片两端连接一根红色导线，如图所示。

校准

如何使电路在正确的速度下运行？

首先用 10 kΩ 的电阻器替换第一个定时器上已安装的 100 kΩ 电阻器，用 47 nF（0.047 μF）的电容器替换 3.3 μF 的电容器。按照理论计算，产生的定时器频率应为 1023 Hz，非常接近你需要的 1000 Hz。

为了对电路进行微调，你需要用微调电位器替

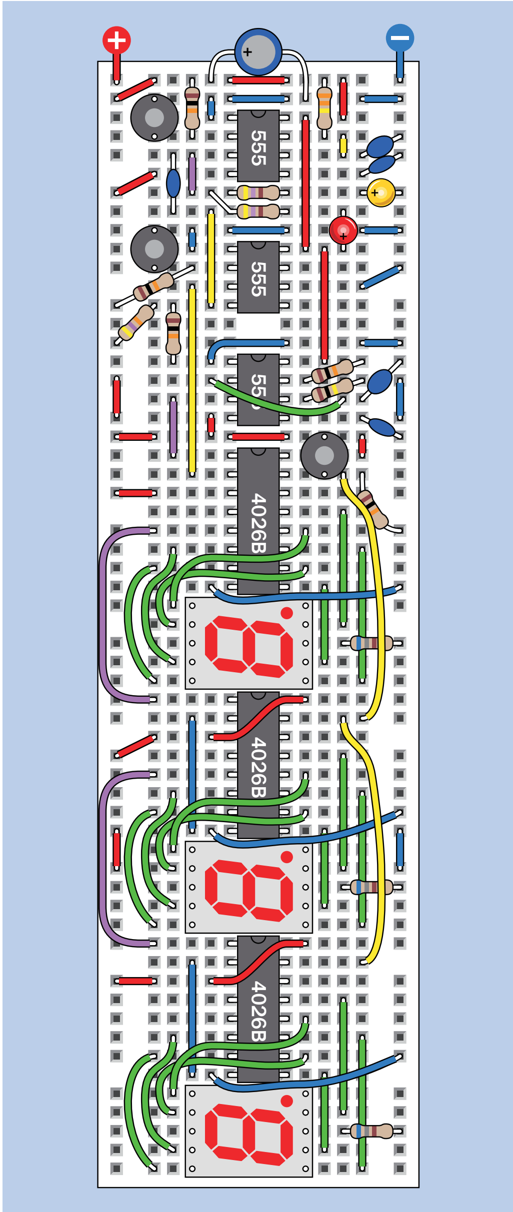


图 4-76　完成的反应速度测试器基本占满了 60 排孔的面包板

换第一个定时器上的一个 10 kΩ 电阻器。元件的安装十分紧密，几乎没有足够的空间，但是我找到了插入微调电位器的方法，如图 4-77 所示，插入的电位器靠近最下方定时器的周围区域。

首先将蓝色导线向上移动一排，将竖直的红色导线向右弯曲。延长剩下的 10 kΩ 电阻器的引脚，注意不要让它碰到任何暴露的引线。现在可以插入微调电位器了，它的滑动片引脚接触电源正极，另一根引脚与定时器的 7 号引脚相连接，第三根引脚插入面包板上空缺的一排，可以忽略。

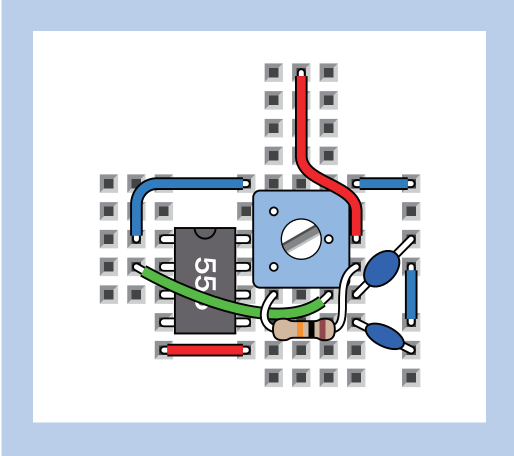


图 4-77　如何插入微调电位器以调节反应速度测试器

微调电位器的阻值上限应为 20 kΩ 或 25 kΩ，滑动片初始位置应该位于阻值的中部。现在有三种方法对电路进行微调，将频率调至 1 kHz。

如果万用表刻度盘上有测量 kHz 的设置，只需将黑色表笔接地，用红色表笔接触第一个定时器的 3 号引脚，转动电位器，直至万用表显示 1 kHz，就大功告成了！

如果你的万用表不能测量频率，也可以使用数字吉他调音器。它们在 eBay 上的售价仅为几美元。将扬声器连接到 555 定时器的输出上（包括 10 μF 耦合电容器和 47 Ω 串联电阻器），调音器会告诉你，定时器产生的音调频率是多少。

如果你的万用表功能不足，也没有吉他调音器，你也可以使用任何按秒计时的手表、钟表或手机测量频率。当定时器频率为 1 kHz 时，第二个计数器每隔 1/100 秒进位，第三个计数器每隔 1/10 秒进位。第三个计数器每输出 10 个数字重复一次，意味着它每秒将显示一次零。

问题是，每个数字的显示时间如此之短，当零出现时，你将很难看清楚，所以下面是你要做的工作。

盖住速度最慢的显示器其他所有的显示段，只露出右下角的显示段。这个显示段只有在显示数字 2 时才熄灭，其他时间都点亮，因此，只观察它的亮灭，比观察整个数字容易得多。调节新加入的微调电位器，让这个最慢的显示器逐渐与计时设备同步。

提升功能

无论何时结束项目，我都能发现改进的余地。以下是我的一些想法。

连通电源时不自动计数。如果电路的起始状态为“就绪”而不是直接跳到计数状态，那就更好了。我把这个问题留给你们思考。

红色 LED 点亮时**发出声音反馈**。此特性并非必要，但若具备则更佳。

计数开始前有随机延时间隔。使电子元件随机响应十分困难，但是有一种实现方法要求使用者把手指放在两个金属触点之间。手指皮肤的电阻值将决定延时的长短。由于每次按压时，手指的压力都不会完全相同，所以延时长短会变化。

下一步呢？

4026B 计数器严格来讲是逻辑芯片。它内部包含逻辑门，能够计数。每台数字计算机都依据相似的原理工作。

因为逻辑在电子学中非常重要，所以我将从下实验 20 开始，深入探究逻辑电路。“与、或、与非、或非、异或、同或”这些有魔力的词语将开启丰富多彩的数字世界之门。

实验 20：学习逻辑

单个逻辑门电路非常容易理解，但是它们连接在一起就有些复杂了。所以，我将每次讲解一个门电路。

本实验包含了大量的讲解内容，但我不奢求你全部理解。本实验的目的是提供足够的信息储备，以便日后参考。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 单极双掷滑动开关 1 个
- ❒ 74HC00 四 2 输入与非芯片 1 枚
- ❒ 74HC08 四 2 输入与芯片 1 枚
- ❒ 低电流 LED2 个
- ❒ 触摸开关 2 个
- ❒ LM7805 稳压器 1 个
- ❒ 电阻器：680 Ω 1 个、2.2 kΩ 1 个、10 kΩ 2 个
- ❒ 电容器：0.1 μF 1 个、0.33 μF 1 个

稳压器

逻辑门电路比你使用过的 555 定时器或 4026B 计数器更挑剔。我们将使用的门电路要求电源电压为精确的 5 V 直流，不能有任何的波动或尖峰电压。

这个目标很容易达到，代价不大。你只需用 LM7805 稳压器给面包板供电，输入稳压器的直流电压为 7 V 或以上，它就能精确输出 5 V 的直流电压。

图 4-78 展示了稳压器三个引脚的功能。图 4-79 中的电路图展示了稳压器的使用方法。图 4-80 阐明了如何将稳压器和两个电容器安装在面包板顶端，以尽量减少占用空间。我在电路板左上角添加了一个小型滑动开关，以及一个低电流 LED，以表明电源何时接通。我认为可视指示最能使人确信电源处于连通状态，尤其是在电路纠错时。考虑到你可能仍然使用 9 V 电池作为电源，与 LED 连接 2.2 kΩ 高阻值电阻器，用于尽可能少消耗电流。

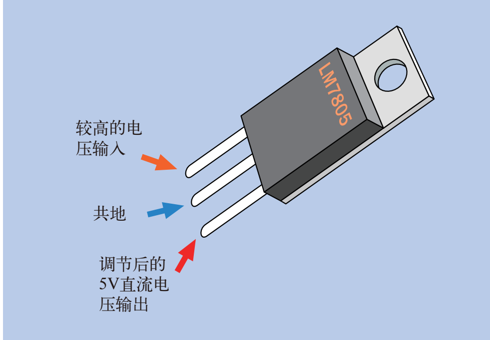


图 4-78　LM7805 稳压器的引脚功能，芯片的金属板在背面

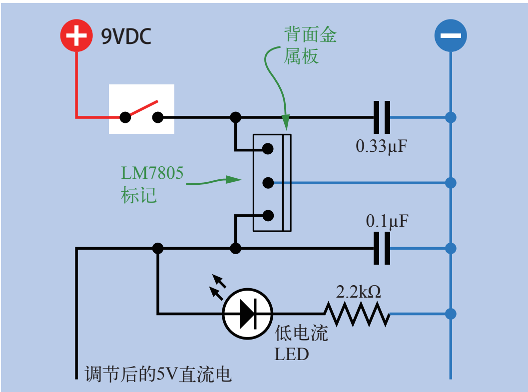


图 4-79　LM7805 稳压器的使用方法（必须连接电容器）

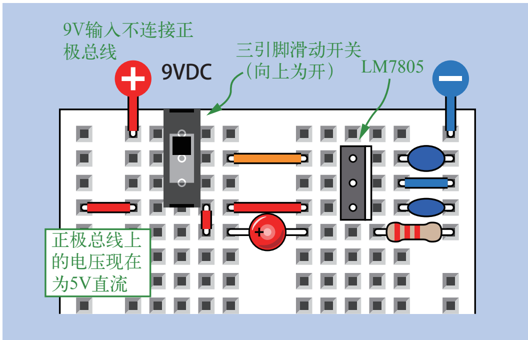


图 4-80　把稳压器安装在面包板顶端，以减小占用空间，同时允许滑动开关和低电流 LED 显示电源已经接通

注意：不合适的输入

不要输入交流。请记住，LM7805 是直流–直流转换器，不要把它与交流适配器混淆，后者使用家用交流电，将其转换为直流。不要把交流电输入稳压器。

注意最大电流。无论通过 LM7805 的电压是多少，只要在额定范围内，它就可以让输出电压基本保持恒定。性能优良。不要试图向稳压器输入大于 1 A 的电流。

注意最大电压。虽然稳压器是固态元件，但它在降压过程中也会发热，与电阻器有些类似。稳

压器的输入电压越高，通过的电流越大，它就有越多的热量需要发散。理论上，你可以输入 24 V 的直流电压，仍然得到 5 V 直流输出，但这个主意并不好。最佳的输入电压范围应为 7 V~12 V 直流。

注意最小电压。与所有的半导体器件类似，稳压器的输出电压小于输入电压，这就是我建议最小输出电压为 7 V 直流的原因。

注意散热。稳压器上顶端有孔的金属背板用于散热，如果用螺栓把它固定到铝片上，散热效果更好，因为铝的导热效率很高。铝片的作用是散热器，你可以买到有很多散热鳍片的奇特散热片。如果你计划通过稳压器的电流不超过 200 mA，就不需用到散热器。本书电路的额定电流均在 200 mA 以下。

使用

在使用 5 V 逻辑芯片搭建电路时，需要面包板正极总线提供 5 V 直流电压。一定要非常注意：图 4-80 中的 9 V 电压输入不在正极总线上，而只与稳压器的上引脚相连接。稳压器的下引脚输出的 5 V 直流电压与正极总线相连接。

面包板的负极总线连接稳压器和外接电源，称为“共地”。

稳压器安装好后，将万用表设置为测量直流电压，测量面包板两总线之间的电压，确保其为 5 V。逻辑芯片很容易因不正确的电压或反向电压而损坏。

第一个逻辑门电路

现在，5 V 直流面包板已经准备好了，下一步是取一对触摸开关、两个 10 kΩ 电阻器、一个低电流 LED 和一个 680 Ω 电阻器，按照图 4-81 所示方法，把它们连接在 74HC00 逻辑芯片旁。（因为你所使用的是低电流 LED，所以 680 Ω 的电阻器比较适合。）

你可能注意到了，芯片的很多引脚都互相短接，连接到电源负极上。我很快就会解释这个。

电源接通后，LED 就会点亮。按下一个触摸开关，LED 仍然发光。按下另一个触摸开关，LED 仍在发光。现在按下两个触摸开关，LED 应该熄灭。

1 号和 2 号引脚是 74HC00 芯片的逻辑输入。电路默认将这两个引脚保持在低电平，通过 10 kΩ 的下拉电阻器连接到电源负极。但是每个按钮开

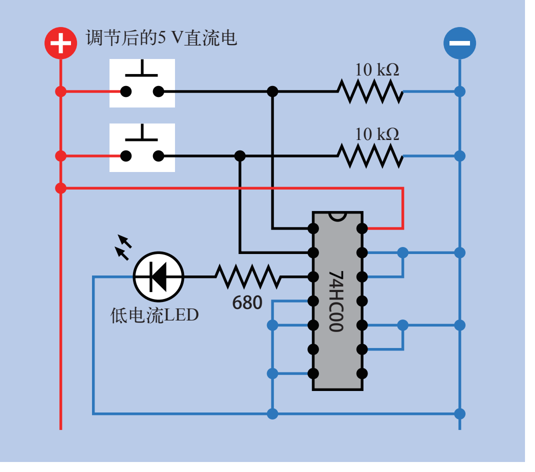


图 4-81　探究与非门的逻辑功能

关都越过电阻器，强迫输入引脚的电压升高到正极总线的 5 V 电压附近。

- 5 V 逻辑芯片的输入或输出接近 0 V，则称之为逻辑低电平。
- 5 V 逻辑芯片的输入或输出接近 5 V，则称之为逻辑高电平。

如你所见，芯片的逻辑输出通常为高电平，但在 1 号与 2 号引脚均为高电平时，输出非高电平。因为芯片进行了“与非”操作，所以称其具有与非逻辑门。

逻辑门可以用逻辑图中的特殊符号表示。与图 4-81 中电路对应的逻辑框图如图 4-82 所示，其中底部有圆圈的 U 形图案是与非门的逻辑符号。逻辑图中没有画出电源，但是回头参考图 4-81 中的电路图，就会发现芯片的 7 号引脚（接地负极）和 14 号引脚（正极）确实需要通电。这使芯片能够输出的电流比输入的电流更大。

无论何时见到逻辑芯片的符号，都要记住：它通了电才能工作。

74HC00 芯片包含四个单独的与非门，每个与非门有两个逻辑输入和一个输出。它们的排列方式如图 4-83 右图所示。因为简单测试只需要一个门，所以未使用的与非门的输入都短接到电源负极，以防止它们悬空。

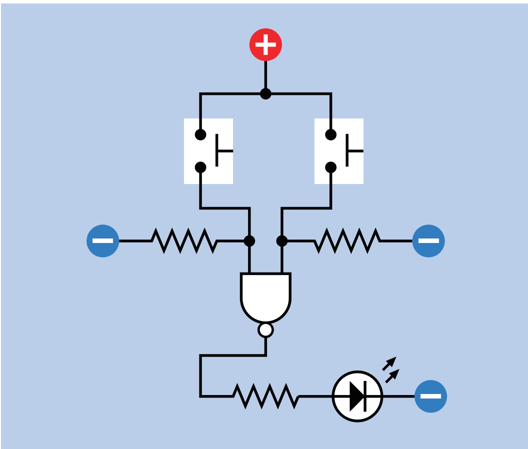


图 4-82　逻辑图比展示逻辑芯片的电路图更易理解

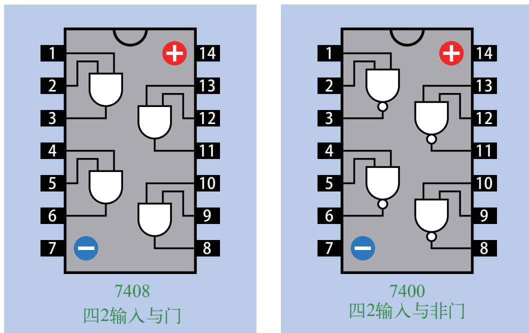


图 4-83　两种逻辑芯片内部的门电路分布

很多逻辑芯片可以互换，让我们现在就来试一试。首先，断开电源。小心地拆下 74HC00 芯片，把它的引脚插入导电泡沫（如果没有导电泡沫，也可以用铝箔）中，用 74HC08 芯片（“与”芯片）代替。一定要确保芯片的连接方式正确，凹痕向上。重新接通电源，像上次一样按动按钮开关，这一次，你会发现当两个输入均为高电平时，LED 才会点亮，其余情况都熄灭。因此，“与”芯片的功能与“与非”芯片完全相反。它的引脚分配如图 4-83 左图所示。

你可能还不明白这些芯片到底有多实用。很快你就会发现，我们可以把逻辑门连接在一起，制作电子密码锁、电子骰子，或者计算机版的玩家竞赛答题电视智力节目。如果你特别有雄心，还可以用逻辑门搭建一台计算机。一位名叫比尔·巴兹比（Bill Buzbee）的电子爱好者竟然真的用老式逻辑芯片搭建出了一台网络服务器，如图 4-84 所示。



图 4-84　比尔·巴兹比手工制造的这块计算机母板使用 74*xx* 系列逻辑芯片搭建，功能类似于网络服务器的核心

背景知识：逻辑芯片的起源

乔治·布尔（George Boole）是一位英国数学家，生于 1815 年，他是如此幸运和智慧，几乎没有几个人能取得他的成就：他发明了一个全新的数学分支。

有趣的是，这个数学分支并不基于数字。布尔有严密的逻辑思维，他希望把世界简化为一系列真假命题，以有趣的方式重叠。

文氏图的概念大约在 19 世纪 80 年由约翰·维恩（John Venn）提出，可以用于说明此种类型的一些逻辑关系。图 4-85 展示了最简单的文氏图，我定义了一个大组（世界上所有的生物）和一个小组（只包含水生生物）。文氏图阐明的是，所有的水生生物也都生活在世界上，但世界上所有的生物只有一个子集生活在水中。

现在我要引入另一个小组：陆生生物。但是请稍等——有些生物水陆两栖，例如蛙类。这些两栖生物同时是这两个小组的成员，我可以用图 4-86 中的另一个文氏图表示，图中的两个小组有重叠。

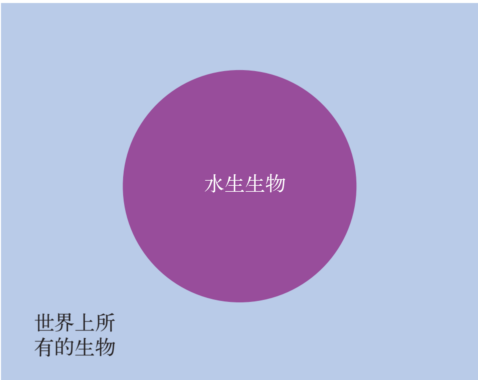


图 4-85　一个小组和包含它的更大范围形成的最简单的关系

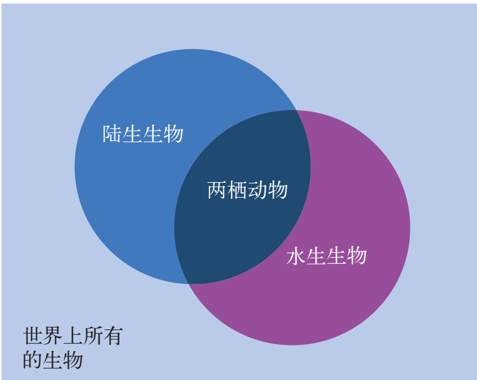


图 4-86　文氏图：世界上有些生物生活在陆地上，有些生活在水中，还有一些水陆两栖

但是，并非所有的小组都有重叠。在图 4-87 中，我定义一个小组为有蹄生物，另一个小组为有爪生物。有没有既有蹄，又有爪的生物呢？我认为没有。我可以画出一个真值表来表达这个观点，如图 4-88 所示。

这张真值表可以用与非门表示，因为它的输入输出模式和与非门完全相同，如图 4-89 所示。

从这些非常简单的概念开始，布尔将他的逻辑语言发展到了很高的水平。1854 年，他出版了一本专著，很久以后书中的内容才应用到电气电子设备中。实际上，布尔在世的时候，他的成果都没有得到实际应用。但是，20 世纪 30 年代，克劳德·香农（Claude Shannon）在麻省理工学院学习时接触了布尔逻辑，1938 年，他发表了一篇论文，描述了布尔逻辑如何通过继电器应用到电路中。这一设想立即得到了实际应用，当时电话网络迅速增长，产生了复杂的开关问题。

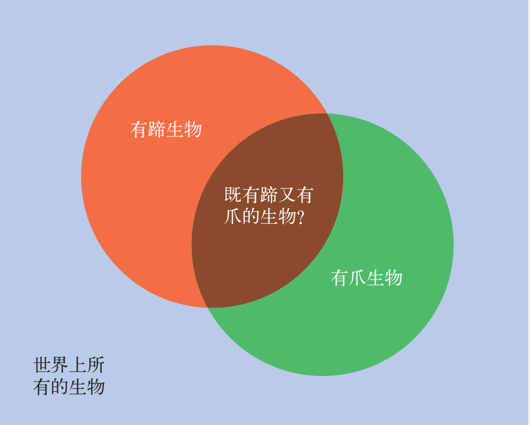


图 4-87　一些子组并不重叠。我认为没有哪种生物既有蹄，又有爪

这种生物有蹄	这种生物有爪	组合输入
否	否	真
否	是	真
是	否	真
是	是	假

图 4-88　最简单的真值表汇总了各种有效的输入组合，每个输入可以选择两种状态中的一种

若与非输入A为	同时若与非输入B为	则与非输出应该为
低电平	低电平	高电平
低电平	高电平	高电平
高电平	低电平	高电平
高电平	高电平	低电平

图 4-89　与非门的真值表与上一张表格的模式完全相同

我们可以用布尔逻辑解释非常简单的电话开关问题。很久以前，生活在农村地区的两家用户经常共用一根电话线。如果一家或另一家想打电话，或者两家都不想打电话，就没有问题，但是他们不能同时占用电话线。如果我们用高电平代表有人想占用电话线，用低电平代表此人不想占用电话线，那么这又是与图 4-89 所示相同的逻辑模式。

但是此处存在重大差异。与非门并非只能用来解释网络，因为电话网络使用电状态，所以它可以用与非门进行控制。（实际上，在电话网络发展的初期，所有控制都由继电器完成，但是一些继电

器的组合也可以起到逻辑门的作用。）

在香农把布尔逻辑应用到电话系统中之后，下一步就是探究用“开”状态代表数字 1，用“关”状态代表数字 0，是否可以搭建出能够计数的逻辑门电路系统。如果该系统能够计数，那么它就可以进行数学运算。

真空管代替继电器之后，人们建造出了第一台实用的数字计算机。然后，晶体管代替了真空管，集成电路芯片又代替了晶体管，从而有了我们习以为常的台式计算机。但是实际上，这些无比复杂的装置的最底层的结构仍然使用乔治•布尔所发现的逻辑定律。

顺便说一下，使用在线搜索引擎时，如果以“与”和“或”来完善搜索结果，你实际上就在使用布尔运算符。

基础知识：逻辑门基本知识

与非门是数字计算机的最基本结构单元，因为你可以只利用与非门进行加法运算。若想学习更多，请上网搜索“二进制算法”和“半加器”。你也可以在我的 *Make: More Electronics* 一书中见到利用逻辑算子进行加法运算的电路。

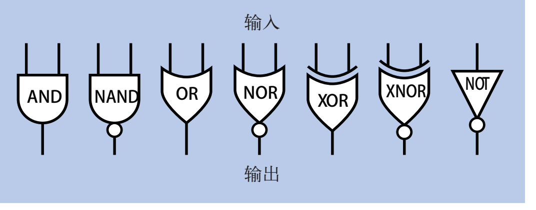


图 4-90　六个双输入逻辑门以及非门的符号

逻辑门一共有七种：与门（AND）、与非门（NAND）、或门（OR）、或非门（NOR）、异或门（XOR）、同或门（XNOR）、非门（NOT），它们的名称通常用大写字母表示。前六种门电路中，同或门的应用最少。

除非门外，所有的门电路都有两个输入、一个输出，非门只有一个输入、一个输出，通常称为反相器。如果它的输入为高电平，输出即为低电平。而如果输入为低电平，则输出为高电平。

图 4-90 展示了七种逻辑门电路的符号。请注意，某些符号底部的小圆圈会将输出反相。（这些小圆圈称为气泡。）因此，与非门的输出是与门的反相。

那么“反相”是什么意思呢？看一看图 4-91、图 4-92 和图 4-93 中的逻辑门真值表就会明白。每张真值表中，左侧一栏有两个输入，右侧一栏对应一个输出，红色代表高逻辑状态，蓝色代表低逻辑状态。比较每对门电路的输出，就

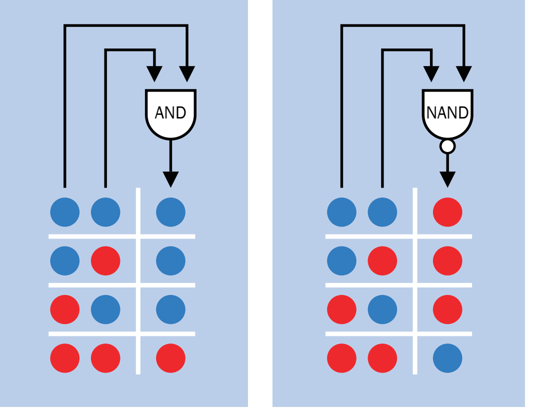


图 4-91　左侧的输入产生了右侧的输出

可以理解输出是如何反相的。

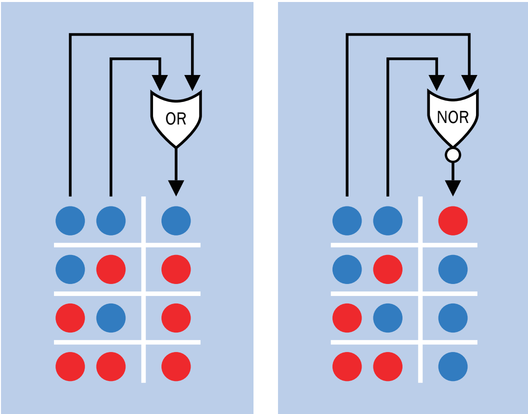


图 4-92　左侧的输入产生了右侧的输出

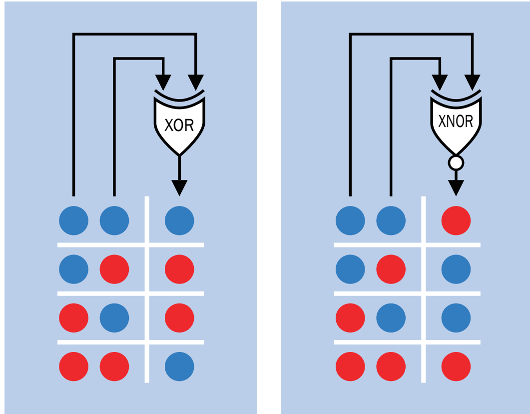


图 4-93　左侧的输入产生了右侧的输出

背景知识：容易混淆的 TTL 和 CMOS

20 世纪 60 年代，最早的逻辑门电路是用晶体管–晶体管逻辑（Transistor-Transistor Logic）搭建的，简写为 TTL，由微小的双极型晶体管蚀刻到单硅晶片上制作而成。之后很快出现了互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor，CMOS）。你在实验 19 中用到的 4026B 芯片就是老式的 CMOS 芯片。

你可能还记得，双极型晶体管能够放大电流。因此，TTL 电路需要在较大的电流下运行。但是 CMOS 芯片对电压敏感，在它们等待接收信号或信号发出后的停顿时刻，几乎没有电流通过。

图 4-94 中的表格总结了这两种芯片的原有优势和劣势。部件编码为 4000 以上的 CMOS 系列芯片运行速度较慢，更容易受到静电的损害，它们的优点是功耗很小。TTL 系列晶体管部件

	TTL	CMOS
	7400系列（后来的CMOS）	4000系列（后来编号为7400）
易受静电影响	更不易	更容易?
速度	更快	更慢?
功率消耗	更高	非常低
电源电压范围	严格要求5 V	更宽泛的5 V~15 V?
输入阻抗	低	非常高

图 4-94　此表格比较了早期的 CMOS 和 TTL 芯片，问号标记的 CMOS 属性最终与 TTL 的属性达成一致

编码为 7400 以上，它们的功耗较大，但是对静电较不敏感，运行速度也很快。因此，如果你想搭建一台计算机，应当使用 TTL 系列晶体管，但是你若想进行一项小发明，用小电池就能给项目进行数周的供电，我建议使用 CMOS 系列晶体管。

从此，一切都变得容易混淆了，因为 CMOS 的生产商希望通过模仿 TTL 芯片的优点获取市场份额。新一代 CMOS 芯片甚至改变部件编号，以“74”开头，强调它们的兼容性，而且 CMOS 芯片交换了引脚功能，以匹配 TTL 芯片的引脚功能；CMOS 还改变了电压要求，与 TTL 匹配。

如今，你仍能见到一些老式的 TTL 芯片，尤其是 LS 系列（部件编码为 74LS00 和 74LS08）。但是，它们已经不太常用了。

4000 系列的 CMOS 芯片更容易见到，例如你在上一个实验中用到的 4026B 芯片。这些芯片仍在生产，它们可接受的电源电压范围较大，这一点非常实用。

经过多年的发展，CMOS 芯片的速度变快了，也不再那么容易受到静电损害，这解释了我在图 4-94 中 CMOS 的一些属性旁边加上问号。现代的 CMOS 芯片也基本将最大电源电压降到了 5 V 直流，而这也是我在电压旁加上问号的原因。

以上情况可以总结如下。

- 可以买到的任何老式 4000 系列逻辑芯片都拥有图 4-94 所列出的特性。你很有可能发现 4000 系列芯片的用途。
- 你不可能用到老式的 7400 系列 TTL 芯片，因为它们没有明显的优点。

你还可能见到有些电路图指定使用 74LS*xx* 芯片，这些可以用 74HCT*xx* 芯片代替，它们的功能完全相同。

74HC*xx* 一代芯片是目前为止通孔格式用途最广的芯片。它们有 CMOS 的高输入阻抗，这一点用处很大；它们也比某些更现代、新奇的芯片便宜。本书使用的所有逻辑芯片都是 HC 一代的芯片。

现在说明部件编号。字母 *x* 代表各种字母和数字可能出现在该位置上。因此，74*xx* 包括 7400 与非门、7402 或非门、74150 16 位数据选择器，等等。74 前面的字母组合是生产商标识，而部件编码之后的字母可能标明封装类型，或者标示封装中是否包含对环境有害的重金属，以及其他细节。图 4-3 形象地解释了以上内容。

以下是 TTL 晶体管的历史。

- 74*xx* 系列：老式原始一代，现已废弃。
- 74S*xx*：高速“肖特基”系列，现已废弃。
- 74LS*xx*：低功率肖特基系列，偶有使用。

CMOS 晶体管的历史如下。

- 40*xx* 系列：老式原始一代，现已废弃。

- ❒ 40*xx*B：4000B 系列性能有所提升，但仍易受静电损害。这些芯片仍然广泛使用，电子爱好者尤为青睐。
- ❒ 74HC*xx*：高速 CMOS，部件编号和引脚分配都与 TTL 晶体管匹配。本书中，我大量使用了这一代的芯片，因为它们很容易买到，而且书中的电路也不需要更高的速度或更大的功率。
- ❒ 74HCT*xx*：与 HC 系列类似，但和老式 TTL 最高逻辑低电平和最低逻辑高电平标准分别匹配。
- ❒ 74*xx* 系列，部件中间有其他字母：更新、更快，通常为表面安装类型，适用于较低的工作电压。

不需要的工具

在我们看来，芯片的速度并不重要，因为我们不需搭建每秒运行上百万次的电路。

少量购买时，芯片族之间的价格差异通常很小。

低电压芯片并不适合我们使用，因为它们基本上都是表面安装类型，而且我们需要制作低压电源。表面安装芯片处理起来要困难得多，它们的唯一主要优点就是小型化，因此我不会使用它们。通孔元件也具有相同的逻辑功能。

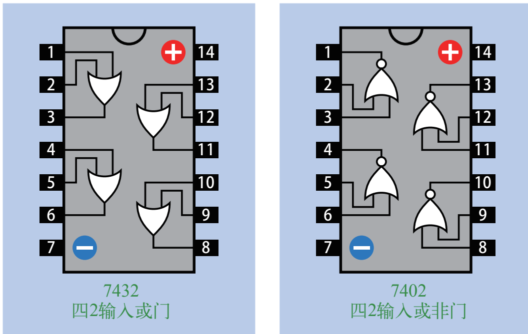


图 4-95　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

基础知识：部件编号和功能

目前能买到的通孔 14 引脚 HC 系列逻辑芯片如图 4-83、图 4-95、图 4-96、图 4-97、图 4-98、图 4-99、图 4-100 和图 4-101 所示。

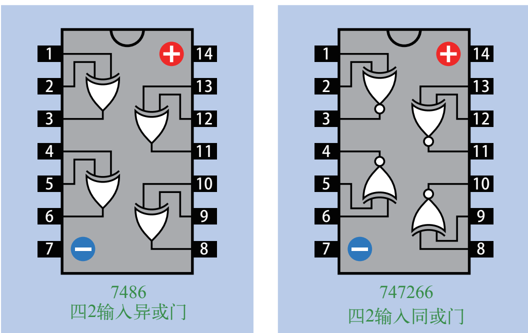


图 4-96　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

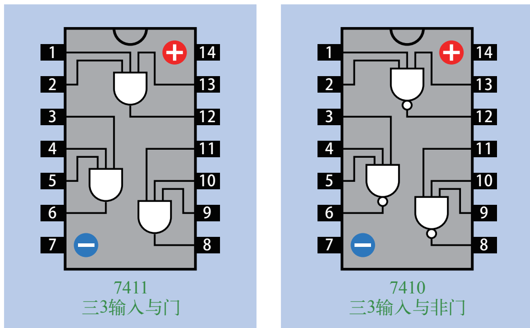


图 4-97　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

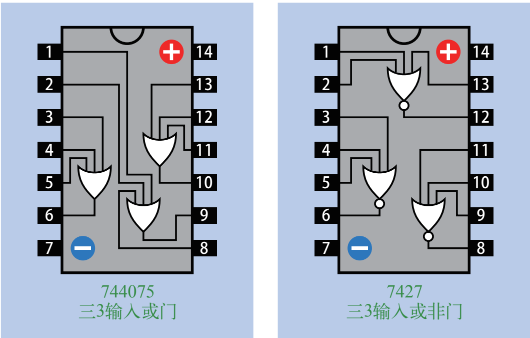


图 4-98　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

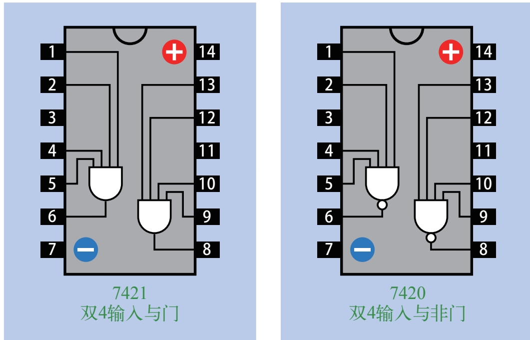


图 4-99　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

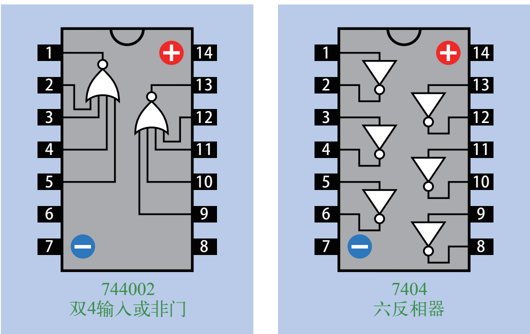


图 4-100　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

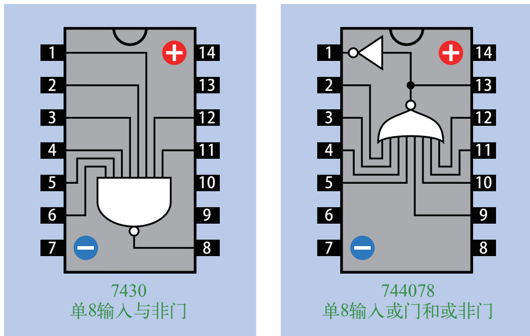


图 4-101　74*xx* 系列逻辑芯片门电路标准结构

这些芯片的所有部件编号都写成了最短形式，因此，7400 芯片的实际部件编号可能是 74HC00、74HCT00，等等，编号前后会添加其他字母编码；但是它通常被称作 7400 芯片，因此我也这样称呼它。

使用芯片前，一定要根据本书的电路图或生产商的数据表检查引脚功能。芯片的内部连接可能会遵循相似的模式，但是也有例外。

基础知识：连接逻辑门电路的规则

以下是可以进行的操作。

- ❒ 可以直接将门电路的输入连接到调节好的电源上，正负极都可以。
- ❒ 可以将一个门电路的输出直接连接到另一个门电路的输入。
- ❒ 一个门电路的输出可以作为其他多个门电路的输入（称为“扇出”）。确切的比例取决于所使用的芯片，但是 74HC*xx* 系列芯片的一个逻辑输出至少可以作为十枚芯片的输入。

- 逻辑芯片的输出可以驱动 555 定时器的触发（2 号）引脚，前提是定时器和芯片连接相同的 5 V 直流电源。
- 低输入不一定要为 0 V。74HC*xx* 逻辑门电路能将 1 V 以下的任何电压识别为“低”。
- 高输入不一定要为 5 V。74HC*xx* 逻辑门电路能将 3.5 V 以上的任何电压识别为“高”。

输入电压的可接受范围及最小保证输出电压如图 4-102 所示。

以下是禁止的操作。

- 输入不能悬空！ CMOS 芯片（例如 HC 芯片族）的所有输入引脚必须与某个已知电压相连，包括芯片上用不到的门电路输入引脚。
- 任何单掷开关或按钮开关都必须连接上拉或下拉电阻器，这样当触点断开时，芯片的输入就不会悬空。
- 不要使用未经调节、高于 5 V 或低于 5 V 的电源为 74HC*xx* 逻辑门电路供电。
- 在用 74HC*xx* 逻辑芯片的输出为 LED 供电时，一定要小心。芯片的输出电流可达 20 mA，但这样会拉低输出电压。如果你将输出电压又连接到了下一个芯片的输入引脚，那么该电压可能被 LED 下拉过多，无法被下一个芯片识别为“高”。一般情况下，不要用逻辑输出同时为 LED 和另一个逻辑芯片供电。在修改电路或设计新电路的过程中，一定要检查电流和电压。

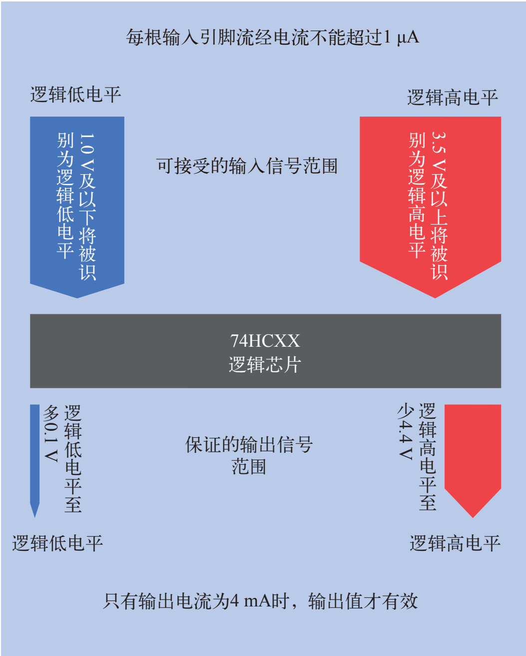


图 4-102 为避免错误，请将逻辑芯片的输入电压控制在建议范围内

- 本书中，我将低电流 LED 与逻辑芯片输出配合使用，我认为这是一个好习惯，如果以后用芯片输出同时为 LED 和另一个逻辑芯片的输入供电，就可以解决问题。
- 不要将大电压或大电流施加到逻辑门的输出引脚上，也就是说，不要把一个输出强加到另一个输出上。
- 因此，不要将两个或以上的逻辑门输出连接在一起。

以上就是所有的注意事项。下面，让我们进行第一个真正的逻辑芯片实验吧。

实验 21：强大的组合

假设你想禁止别人使用自己的电脑，我能想到两种方法：使用软件或硬件。软件可以是某种拦截正常开机顺序的启动程序，需要输入密码。它比 Windows 和 Mac 操作系统的标准密码防护更加安全。

你当然可以这样做，但是我认为如果使用硬件会更加有趣，与本书内容也更相关。我想象的是一块数字小键盘，要求使用者键入密码组合，才能开启电脑。我叫它“组合锁”，虽然它实际上什么也没锁，它禁用了用于开启电脑的电源按钮。

注意：保修问题

如果把这个项目一直做完，你需要打开台式计算机的外壳，剪断一根导线，装入自己的电路，而不会与计算机内部的任何面板近距离接触，只需将导线连接到计算机的电源按钮上即可。但是，如果你的计算机是崭新的，以上操作将会使机器的保修条款无效。我自己并没有注意这个问题，但是如果这让你感到不安，还有三种选择方案。

- ❐ 在面包板上搭建电路，仅供娱乐，不作实际应用。
- ❐ 将该电路用在其他装置上。
- ❐ 在旧的计算机上应用该电路。

需要的工具

- ❐ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❐ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❐ 低电流 LED1 个
- ❐ 通用 LED1 个
- ❐ LM7805 稳压器 1 个
- ❐ 74HC08 逻辑芯片 1 枚
- ❐ 555 定时器芯片 1 枚
- ❐ 2N2222 晶体管 1 个
- ❐ 双极双掷 9 V 直流继电器 1 个
- ❐ 1N4001 二极管 1 只、1N4148 二极管 3 个
- ❐ 电阻器：330 Ω 1 个、470 Ω 1 个、1 kΩ 1 个、2.2 kΩ 1 个、10 kΩ 6 个、1 MΩ 1 个
- ❐ 触摸开关 8 个
- ❐ 多种可选工具，用于拆开计算机外壳、钻出四个小孔、在小孔间锯出长方形豁口，用于安装密码键盘（如果你想把实验做到底）。另外，需要四颗小螺栓，把键盘固定在机箱的豁口上。

三段式电路

图 4-107 展示了完整的面包板电路，但是在开始搭建之前，让我们先观察一下电路图。

电路图分为三个部分。

(1) 电源和三个虚拟按钮开关

(2) 能动的按钮开关和逻辑电路

(3) 输出

图 4-103 中的电路图展示了第一部分，十分简单。按下按钮 A，稳压器获得 9 V 直流电压，它向左侧的总线输出 5 V 直流电压。按钮 A 还向右侧的品红色导线提供 9 V 直流电压，其原因我很快就会阐述。

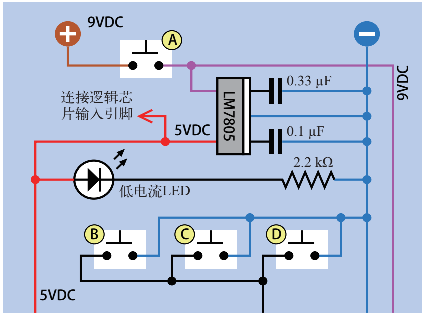


图 4-103　电路的上端部分

另外，请注意按钮 B、C 和 D，它们中的任何一个都能与接地负极连接。

现在请观察图 4-104，图中展示了电路的中间部分，使用了逻辑符号。想象该电路与图 4-103 中的电路相连的情景。按钮 E 至 H 都可以向与门提供高电压，与门的左侧输入被 10 kΩ 的下拉电阻拉低。每个门电路的输出都馈送到下一个门电路的输入。

最后，图 4-105 展示了电路的下端部分，最后一个与门的输出激活晶体管，该晶体管又触发了 555 定时器。定时器控制继电器，继电器用于给计算机（或其他使用简单开关按钮的任何设备）上锁或解锁。

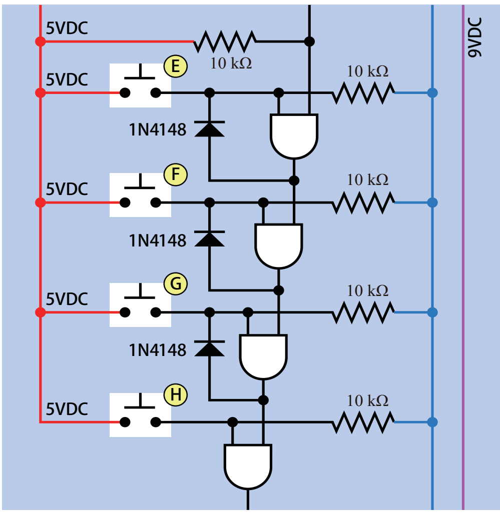


图 4-104　电路的中间部分，使用了逻辑符号

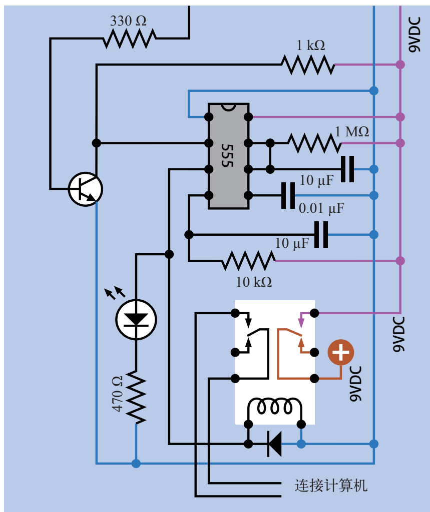


图 4-105　电路的下端部分

电路的工作方式

以上为电路设置，你需要按住按钮 A 使电路激活，而在键盘上输入密码序列时，需要一直按住按钮 A。这样就满足了两个要求：当你未使用电路时，它不会消耗电能，你也不会错误地将电路保持在开启状态。

密码序列要求你在按住按钮 A 的同时，顺序按下 E、F、G、H 四个按钮。当然，实际安装电路时，可以打乱按钮的位置。我将它们摆成面包板的样式，这只是为了让电路简单明了。

假设你按住了按钮 A，然后按下密码序列中的第一个按钮 E，以解锁电路。在图 4-104 中，你会看到按钮 E 直接将 5 V 电压导通到第一个与门左侧的输入上，压制了下拉电阻，所以左侧输入现在为逻辑高电平。

与门的右侧输入通过 10 kΩ 电阻器拉高，因此，与门的两个输入现在均为高，因而它的输出从低变为高。

与门的输出电流通过二极管回到左侧的输入。因此，你可以松开按钮 E，而与门的输出仍将保持其左侧输入为高电平，它实现了自身锁存，和实验 15 中的继电器一样。这是因为它拥有自己的电源（逻辑电路图中未画出），即使输入电压有小幅下降，输出电压也能够维持。

第一个与门的高输出也与第二个与门的右侧输入相连接。第二个与门的右侧输入为高电平，因此当你按下按钮拉高左侧的输入时，第二个与门的输出也会变高。请注意，之前第二个按钮没有效果，你需要第一个与门输出高电压，馈送到第二个与门。

❒ 按下每个按钮后，旁边的与门形成锁存，你就可以松开按钮了。

❒ 一定要按顺序按压按钮。如果不按照顺序按压，什么都不会发生。

❒ 整个过程中，都要按住按钮 A。

现在看一看按钮 B、C 和 D。如果在键入密码解锁电路时按下了这些按钮，又会发生什么呢？任何一个按钮都会拉低第一个与门的右侧输入，因此与门的输出会变为低电平。如果与门已经锁存，则会解锁存。而且，第一个与门的低输出会解锁存第二个与门，而第二个与门的低输出会解锁存第三个与门。

B、C、D 中的任何一个按钮都会重置整个电路，我添加它们的目的是使密码更加复杂。我自然要假设你安装此系统时，所有的按钮外观都相同。

多个按钮?

如果有人同时按下了多个按钮（同时也按住了按钮 A），会发生什么？结果将难以预测。如果所有的按钮 E、F、G、H 一起按下，继电器将被激活，但如果 B、C、D 中的任何按钮同时也被按下，那么什么都不会发生。需要同时按下多个按钮是此电路的缺陷，但有人同时按下 A、E、F、G、H 按

钮，而不按下 B、C、D 的概率很小。为了进一步减小该风险，你可以添加更多的“重置”按钮，与 B、C、D 并排安装。

触发继电器

假设输入的密码组合正确，最后一个与门向晶体管基极施加约 5 V 的电压，如图 4-105 所示，晶体管导通，从而减小了 555 定时器 2 号引脚和接地负极之间的电阻，触发定时器。

定时器的供电电压为 9 V，电源电压通过右侧的品红色导线传递而来。定时器的输出必须足够大才能激励继电器。现在观察继电器的作用：它右侧的一对触点为 9 V 总线提供了替换电源。

只要 555 定时器继续输出脉冲，继电器的触点就保持闭合。只要继电器触点闭合，它就会为电路供电，包括定时器。是的，定时器给继电器供能，继电器也为定时器供能。

现在你可以松开按钮 A 了，只要定时器仍在输出脉冲，继电器就会保持闭合。约 30 秒后，脉冲终止，切断继电器的电源，使其触点断开，同样也使定时器和电路的其余部分关闭。现在，电路不消耗任何功率。

继电器左侧一对触点是为计算机的电源按钮供电。因此，在定时器为继电器供电的短暂时间里，你需要启动计算机。其他时间，电源按钮将无法工作。

逻辑芯片

现在请观察图 4-106。它是电路的中间部分，我用一片含有四个 2 输入与门的 74HC08 逻辑芯片重新绘制了这部分电路图。它与图 4-104 中的逻辑电路图功能完全一致，你可以将两幅图进行比较，观察它们为何功能相同。两者最大的区别是，包含芯片的电路阐明了元件的实际安装方法，但是你也可能感到这幅图难以理解。逻辑电路图自有它们的用途。

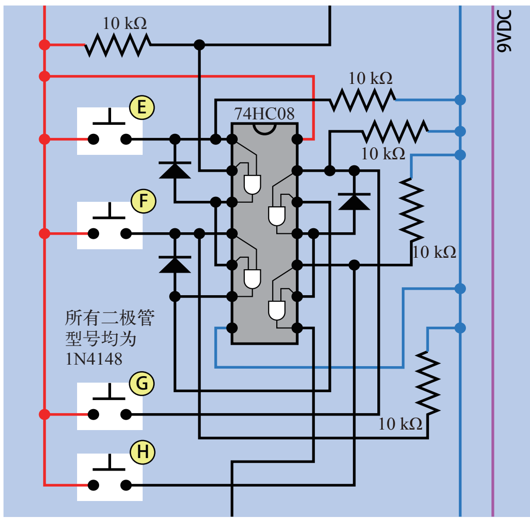


图 4-106　电路的中间部分，此处展示了实际元件

该搭建电路了！

完整的面包板电路如图 4-107 所示。本电路不能按阶段进行测试，只能搭建完整再测试。图 4-108 展示了各元件的取值。

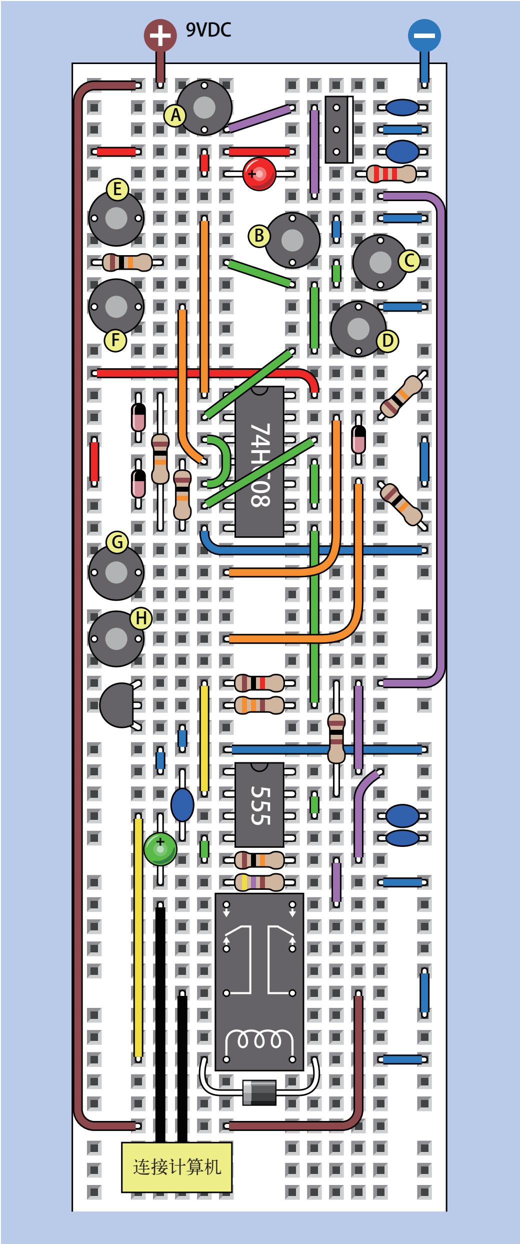


图 4-107 电子组合锁的完整面包板电路

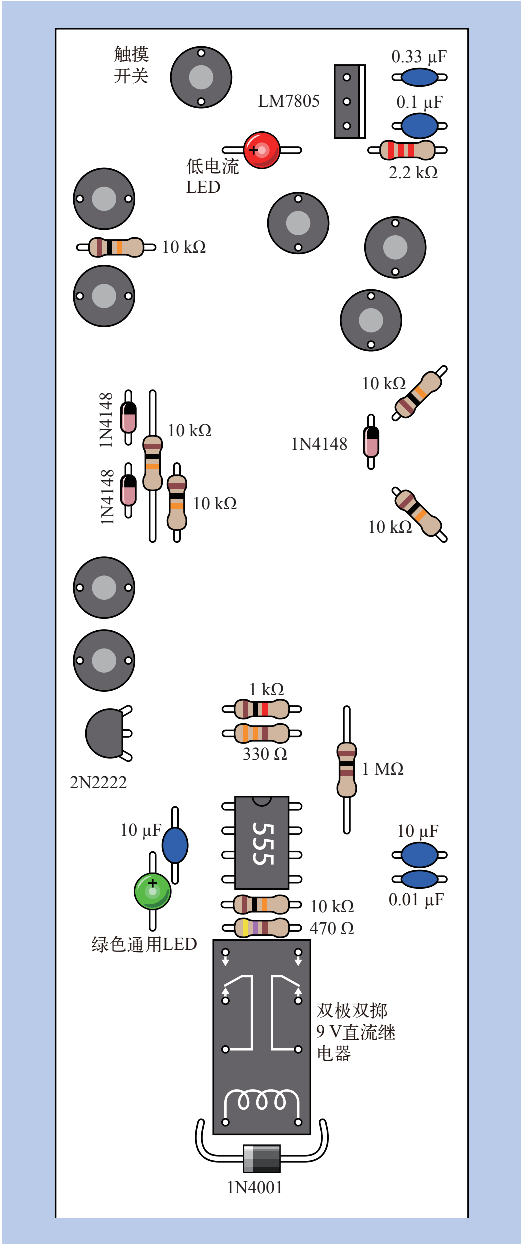


图 4-108 面包板电路各元件的取值

设置

一定要注意将电路中的两种电压互相隔离。5 V 直流电压不足以使继电器运转起来，但 9 V 直流电压会烧坏逻辑芯片。面包板左侧的总线连接 5 V 直流电压，而未经切换的 9 V 直流电压经过图 4-107 中面包板左侧的棕色导线供给继电器。右侧的紫色或品红色导线运载 9 V 直流电压，该电压由按钮 A 或继电器右侧触点接通。

- 棕色表示来自电池或交流适配器未经切换的 9 V 直流电压。
- 品红或紫色为经继电器或按钮 A 接通的 9 V 直流电压。
- 红色为 5 V 直流电压，由稳压器提供。

电路搭建好以后，连接 9 V 直流电源，按住按钮 A。红色 LED 亮起，但没有其他现象出现。

按住按钮 A 不动，从上到下顺序按下再松开 E、F、G、H 四个按钮。完成后，绿色 LED 点亮，表示继电器已经闭合，电路已经成功解锁。

松开按钮 A，LED 会保持发光约 30 秒钟，然后电路自动断电。在这段时间内，如果电路安装在计算机上，你就能启动计算机。

电路断电后，它消耗的功率为零。你可以用 9 V 电池给它供电，不夸张地说，电池可以用上好几年。

再次按下电源按钮，以不同的顺序按下 E、F、G、H 四个按钮，也试着按下 B、C、D 中的某些按钮。绿色的 LED 不会点亮，继电器也不接通。

假设你安装了完整的电路。为了搞定密码，你必须知道以下几点

- 输入正确的密码序列时，要一直按住按钮 A。
- 如果按错了按钮，密码必须重新从头输入。
- 只有 E、F、G、H 四个按钮有效，必须按照此顺序输入。

我觉得这种配置非常安全。但是如果你想让电路更安全一些，可以添加更多的按钮。

测试

将万用表设置为测量连续性，把它的表笔（使用带弹簧夹的测试引线）固定到继电器左侧标有“连接计算机”的输出上，如图 4-105 所示。这两根导线上没有电压，所以你需要把万用表调到连续性测试模式，以证实继电器内部的触点已经闭合。

输入正确的按钮组合，万用表就会发出蜂鸣声。松开按钮 A，在 555 定时器为继电器供电的时间内，万用表仍会蜂鸣。定时器的周期结束后，继电器断开，万用表停止蜂鸣。

你可以把万用表重新设置为测量电流，把它连接到电池正极和面包板的 9 V 直流输入点之间。在按下按钮 A 之前，万用表都将显示没有功率消耗。

处理二极管的问题

本电路包含两种锁存方式。锁存继电器的系统不太寻常，但能满足这样的条件：当电路不使用时，电路中不通过任何电流。与门自锁系统则是另一种系统。

第四个与门不需要锁存，因为定时器只需要短暂的脉冲（来自按钮 H）就可开启。但是前三个与门需要锁存，为使输出在按钮 E、F、G 松开后保持高电压。二极管将门电路的输出电流反馈到门电路的输入，以此保持与门的锁存。

你能发现其中的问题吗？记住，二极管上的压降约为 0.7 V，而逻辑门需要清楚区分高电平和低电平输入。如果你把二极管连入逻辑电路，而没有跟踪观察电压，最后得到的逻辑门可能无法辨认本应为高电平的输入。我在实验 15 中也关注过这个问题，晶体管削减后的电压再通过二极管，可能无法触发继电器。

如果不能确定，你可以用万用表验证电压，再对照图 4-102 中所示的输入要求。

在本实验的组合锁电路中，前三个与门的输出都只通过一个二极管回到输入，所以它们没有理由不可靠运行。你只需在连接将二极管和逻辑芯片时保持小心谨慎。

可能你又要疑惑了：如果二极管不是让逻辑门形成自锁的常规方法，那么理想的方法究竟是什么呢？

一种选择方案是用导线代替每个二极管，把信号反馈回门电路的输入。那么，二极管到底起着什么样的作用呢？

它们有非常重要的用处。如果二极管用导线代替，那么按钮开关提供的高电压也会流过这段导线，一直流到逻辑门电路的输出。

> 把电压输入任何逻辑门的输出都不是好事。

将逻辑门锁存在电路中的正确方法是使用触发器。我以前把双稳态模式的 555 定时器用作触发器，是因为当时我们已经接触了定时器，而且我也想展示它的应用。但是在本电路中，添加四个 555 定时器仅为实现锁存并不合适。你可以购买含有多个触发器的芯片，也可以将两个与非门或两个或非门组合在一起形成触发器，这些我将在实验 23 中讲解。

对于这个组合锁电路，我想使芯片的个数和电路复杂度最小化。使用二极管是达到要求的最简方式。

问题

第四个与门的输出只是一个高电压脉冲。为什么直接用它触发定时器，而不是连通继电器呢？

一个原因是，继电器开启时需要的浪涌电流超过了与门能提供的最大电流 20 mA。而且，我当然也想从定时器获取时长固定的脉冲。

好吧。但是我为什么要向电路中添加晶体管呢？因为与门输出高电压脉冲，而定时器的触发引

脚需要低电压。晶体管提供了将高电压转换为低电压的方式。加入非门（反相器）也能达到同样的目的，但是会增加芯片的数量。

既然那样，为什么我不用与非门代替与门呢？与非门的两个输入均为高电压时，输出才为低电压，其他情况输出均为高电压。这个特性似乎恰好与 555 定时器的要求吻合。如果使用与非门，就可以省略晶体管了。

确实如此，但是前面的与门需要用高输出反馈并维持高输入。我只能用与非门替换最后一个与门，为定时器产生正确的输出。这意味着你不仅仍需使用 74HC08 芯片，还要添加 74HC00 芯片，只为使用它的一个门电路。晶体管更简单，占用的空间也更少。

还有另外一个问题。为什么我在电路中连入了两个 LED 呢？因为在按压按钮解锁计算机时，你需要知道正在发生的事情。通电指示 LED 能表明电池完好。继电器接通指示 LED 可以表明系统已经解锁，以防你听不到继电器的咔哒声。

最后是最重要的问题：假设你愿意尝试，怎样才能将这个电路安装在计算机上呢？做起来比听起来更容易，我将很快进行解释。

计算机界面

首先，确定组合锁电路连接正确。一个接线误差就可能导致电路通过左侧的继电器触点传输 9V 直流电压，而不是仅仅闭合开关。这一点非常重要！

为了完全确定连接的正确性，请将万用表调节成测量直流电压，测量触摸开关上正确的结合点。如果绿色 LED 点亮，而万用表测不到电压，则连接正确。若出现其他现象，说明出现了接线错误。

现在让我们了解一下当你开启计算机时，计算机会如何运行。

老式计算机的背面通常有一个巨大的开关，连接到计算机内部的重型金属盒上，该金属盒将住宅供电转换为调节好的直流电压，供计算机使用。大多数现代计算机已不采用这种设计，插上电源，如果不是苹果电脑，按一下计算机前面的小按钮即可，如果是苹果电脑，按一下键盘上的小按钮即可。这个按钮通过内部导线连接到计算机母板上。

从我们的角度看来，这一设置非常理想，因为这样就不需对高电压大动干戈了。在计算机的内部，不用考虑打开内嵌风扇、包含计算机电源的金属盒，只需找到连接电源按钮和计算机母板的导线。通常情况下，这根导线只由两根细导线组成，但在某些计算机上，它是带状电缆的一部分。诀窍是仔细观察按钮的触点，它们会连接到你需要的导线。

首先确保**计算机未接通电源**，并给自己接地（因为计算机内含对静电敏感的 CMOS 芯片），小心地从按钮上剪断两根导线中的一根。现在把计算机的插头插入插座，试着按下电源按钮。如果什么都没有发生，你可能剪对了导线。即使你剪错了导线，也能阻止计算机启动，这也是你需要的，所以也可以这样做。

记住，我们不向这根导线上施加任何电压，而只是把继电器用作开关，重新连接被剪断的导线。如果你保持冷静，耐心操作，找到了连接电源按钮的单根导线，就应该没有问题。如果你实在担心出错，可以上网查找计算机的维护手册。

找到导线，剪断其中的一根，在进行下面的步骤时，请保持计算机不接通电源。

找到导线与计算机母板的连接处，那通常是一个不可拔除的小连接器。首先对它进行标记，这样你就能知道如何把它正确插回，更好的方法是拍照。然后剪断导线，遵循以下几个步骤。

剥除被剪断的导线两端的绝缘层，再增焊一段双导体导线，如图 4-109 所示，使用热收缩管保护焊接点。（这一点非常重要！）

将新焊接的导线与继电器连接，要确保导线连接到电路解锁时继电器闭合的一对触点上。你可不希望犯这样的错误：你以为电路已经加锁，实际上却解锁了，反之亦然。

重新连接好从计算机母板上拆下的连接器，插上计算机的电源，按下电源按钮。如果什么都没有发生，非常好！现在输入键盘上的密码组合（同时按住电源按钮以使电池供电），等待绿色 LED 点亮。现在再次按下电源按钮，计算机就能启动了——在电路允许的 30 秒钟内正确输入密码即可。

电路测试完毕，剩下的任务就是安装了。你只需记住，想把密码键盘安装在图 4-110 所示的位置，就要把机箱单独拆下来。

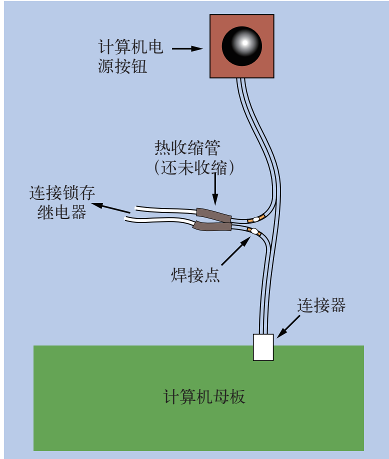


图 4-109　组合锁电路可以安装在普通的台式计算机表面上，方法是剪断与电源按钮相连的一根单导线，焊接延长导线，并用热收缩管覆盖焊接点

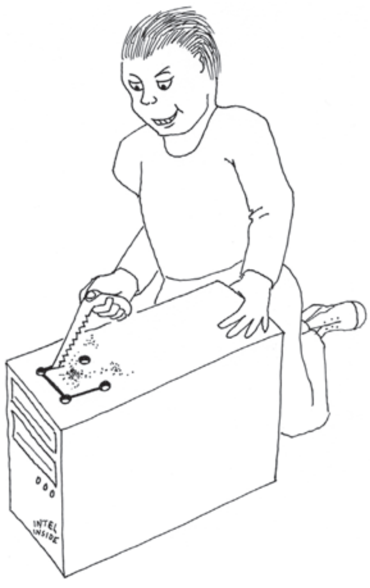


图 4-110　安装密码键盘的一种可选方案（不是很推荐）

功能增强

在任何项目的末尾，你都可以做更多的事情。

使用键盘。在本书第 1 版中，我建议此项目使用数字键盘，但是有些读者感觉数字键盘太过昂贵，而有些读者找不到合适的键盘。我考虑了一下，决定这一次使用触摸开关。它们很容易安装在面包板上。如果你想搭建固定电路，可以直接将八个按钮开关安装在金属片或塑料片上。但是键盘仍

旧是一种可选方案，只要不是矩阵编码形式的键盘就好，因为那种键盘是专为微控制器而设计的。你要使用的键盘引脚数应当比按钮数恰好多一。

为继电器供电。你可能想知道 555 定时器的输出电压是否足够使继电器可靠运行，这也是我在实验 15 中讨论过的问题，我当时决定不通过晶体管–二极管组合为继电器供电。问题是，555 定时器的输出电压根据输出负载的大小而变化，这就是我建议本实验使用高灵敏度继电器的原因。一般来说，这种继电器的工作电流小于普通继电器的三分之一，能够满足演示目的。本书中我想指定一种继电器，用于所有的项目，但是如果你计划安装这个电路，让它每次都一定能正常运行，即使在 9 V 电池没电的情况下也能运行，那么就可以考虑替换 6 V 直流继电器。真的吗？定时器输出不会让它过载吗？不一定。有些继电器能忍耐过电压，例如，根据数据表，Omron G5V-2-H1-DC6 6 V 继电器允许继电器两端电压为额定电压的 180%。一如既往，最佳建议是充分测试电路，考虑各种方案，阅读数据表。

保护计算机。为了使电路更安全，可以拆除固定计算机机箱的普通螺钉，用于预防护螺钉代替。你自然也需要适合螺钉的特殊工具，用来进行安装。（如果安全系统由于任何原因发生了故障，你也需要拆卸螺钉）。

更新密码。另一种功能增强方法是在需要时改变密码。如果你已经把电路焊接好，则这一点较难实现，但是你可以安装小插头和插座（称为“连接头”），帮助你交换导线。

自毁式安全保障。特别偏执的人可以设置这样的电路。输入错误的密码会触发又一个高电流继电器，提供巨大的功率过载，熔化 CPU，使巨大的电流脉冲通过硬盘。对于固态硬盘，可以考虑安装“自杀式继电器”，它提供的电压比 5 V 直流输入电压更大。但是我自己并不推荐这样做。

毋庸置疑，毁坏硬件相比用软件擦除数据有很大的优势。它的破坏速度更快，难以停止，破坏也通常是永久性的。这样，当美国唱片产业协会（Recording Industry Association of America，RIAA）的人来到你家，请你打开计算机，搜索非法分享的文件时，你只需无意地给他们输入错误的解锁密码，在一旁坐好，等待绝缘层熔化的刺鼻气味（或者一束伽马射线，如果你采用了原子能方式，如图 4-111 所示）即可。

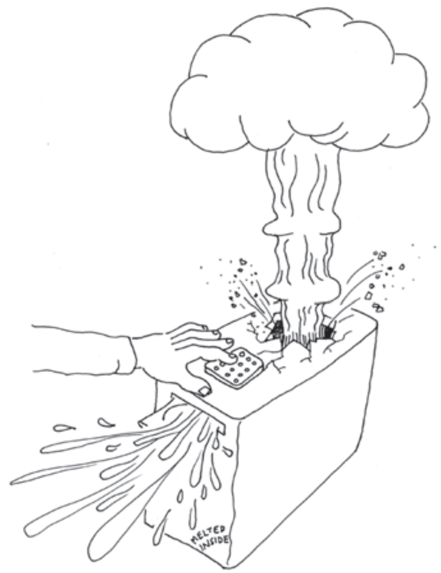


图 4-111 对于特别特别偏执的人，由密码组合控制的熔断 / 自毁系统可以更有效地防止数据窃取，也能应付 RIAA 调查人员针对文件分享提出的讨厌问题

从更现实的角度看，没有任何系统是完全安全的。硬件锁定装置的价值在于，如果确实有人毁坏了它（例如，拧下了干预防护螺钉，或者用金属剪刀直接把键盘从机箱上剪掉），你至少会知道计算机受到了攻击，如果你把少量颜料滴在螺钉上，显示它们是否被破坏过，就更容易发现这一点了。相比之下，如果你用的是密码保护软件，有人破译了密码，你可能永远都不会知道系统被盗用过。

实验 22：快手抢答

下一个数字逻辑电路将带领我们熟悉反馈的概念，即将电路的输出导回输入，以影响输入。此项目将用输出阻塞输入。这个实验很小，却很精细，而它的概念未来也会对你有帮助。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 74HC32 逻辑芯片 1 枚
- ❒ 555 定时器 2 个
- ❒ 单极双掷滑动开关 2 个
- ❒ 触摸开关 2 个
- ❒ 电阻器：220 Ω 1 个、2.2 kΩ 1 个、10 kΩ 3 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 2 个、0.1 μF 1 个、0.33 μF 1 个
- ❒ LM7805 稳压器 1 个
- ❒ 通用 LED 2 个
- ❒ 低电流 LED 1 个

目标

在 Jeopardy! 这样的智力竞赛节目中，选手抢答每个问题。第一个按下抢答按钮的人自动闭锁其他选手的按钮，使他们的按钮失去作用。我们怎样才能搭建出具有相同功能的电路呢？

上网搜索一下，你会发现在一些电子爱好者网站上，有的人给出了自己的电路，但是这些电路缺乏一些我认为必要的功能。此处我要使用的方法既简单，又周密。简单的原因是芯片总数很少，而周密的原因是电路包含“节目主持人控制”，更加真实。

我将首先讲解二人制竞赛的初步设想，这个设想实现后，我将它扩展到四人甚至更多参赛者。

概念化实验

我要展示此项目如何从初步设想中脱胎而出。通过讲解电路开发的步骤，我希望能够启发你，让你在将来形成自己的设想，这一点比重复别人的工作更为可贵。

首先考虑基本概念：有两名参赛者，每人有一个按钮，首先按下按钮的选手将另一名选手的按钮闭锁。

有时候，绘出草图能帮助我想象，所以我将从绘图开始。在图 4-112 中，每个按钮发出的信号通过我想象的元件“按钮阻塞器”，它由另一名选手的按钮激活。我并不确定按钮阻塞器将是什么装置，或者它将如何工作，但是它将由首先按下按钮的选手激活，并阻止另一位选手。

仔细观察后，我发现了一个问题。如果我想扩展到三名选手，电路就会变得复杂，因为每名选手都必须激活两名对手的“按钮阻塞器”，而如果有四名选手，每名选手就必须激活三名对手的“按钮阻塞器”，线路连接将难以处理。图 4-113 展示了这个问题。

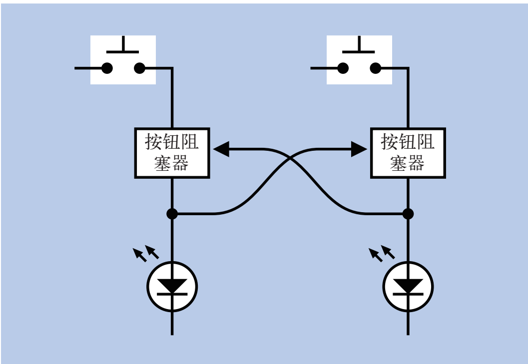


图 4-112　基本概念：首先按下按钮的选手会阻止另一名选手

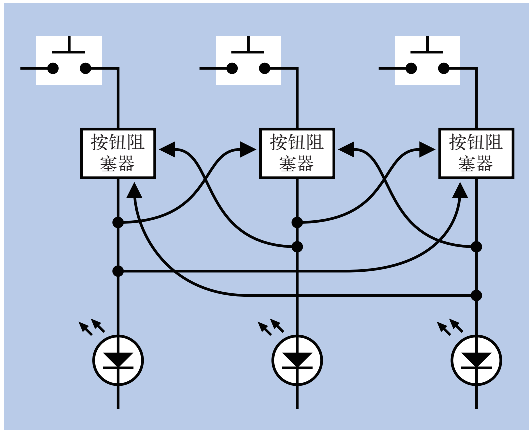


图 4-113　把选手的数量从两名增加到三名，连接点个数增加了一倍多

每次我见到这种复杂的情况，都会觉得一定有更好的解决方案。

还有另一个问题。选手的手指离开按钮后，其他选手的按钮又将解锁。这让我想到，和实验 15、实验 19、实验 21 一样，我需要使用触发器，也叫锁存器。它的作用是保持第一名选手的按钮发出的信号，继续阻止其他选手，即使在第一名选手松开按钮之后，也是如此。

听起来似乎更复杂了，但是请等一等。如果第一名选手的按钮触发了锁存器，锁存器就会使该选手的电路保持通电，他的按钮就无效了，因此，锁存器可以阻塞所有的按钮。这样事情就简单多了，我可以总结出一系列事件。

- 第一名选手按下按钮。
- 他的信号被锁存。
- 被锁存的信号反馈回电路，阻塞所有的按钮。

图 4-114 所示的新草图展示了这个构思。现在，电路布局实现了模块化，可以扩展到几乎任何数量的选手，只需增加电路模块，而不会使复杂度增加。

但是还缺少了一样重要的东西：重置开关。在选手按下按钮，决出胜负之后，系统要回到开始模式。而且，我还需要一种方法，防止选手在节目主持人提问完成之前过早按下按钮。或许我可以将这两种功能结合于同一个开关，该开关受主持人控制。

请参考图 4-115。在“重置”位置上，主持人的开关可以重置系统，移除按钮接通的电源。在“设置”位置上，该开关不再将系统保持在重置模式，向按钮供电。图中我画出的是两名选手，这是为了使一切尽可能简洁，但是概念仍然很容易扩展。

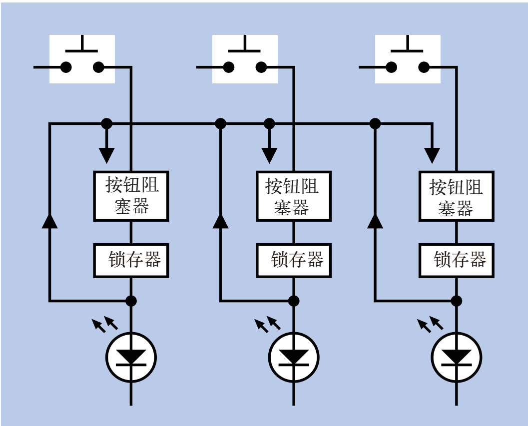


图 4-114　现在任何锁存器都可以阻塞所有的按钮

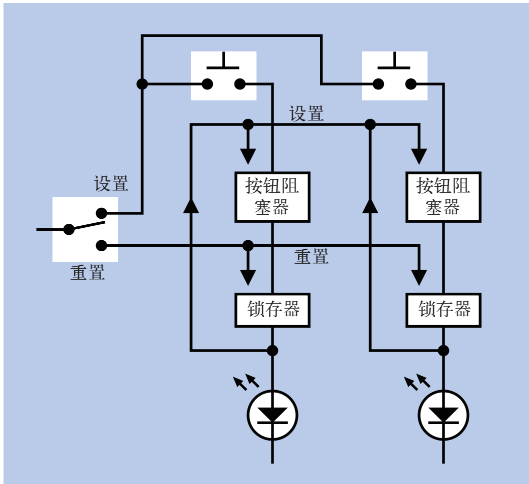


图 4-115　添加了节目主持人的控制开关

现在我需要处理电路图中的逻辑问题。我把所有元件都画成连接好的样子，用箭头表示信号的方向，但我实际上不知道怎样阻止信号向错误的方向运动。如果不处理这个问题，任何一名选手的信号都会同时点亮两个 LED。如何阻止这件事发生呢？

我可以把二极管放置在“上行”导线上，阻止电流沿导线向下流动。但是我有一个更精妙的主意：添加一个或门，因为或门的输入互相电隔离。图 4-116 展示了这一点。

基本的或门只有两个逻辑输入，这会妨碍我添加更多的选手吗？不会的，因为你可以买到三输入、四输入甚至八输入的或门。如果任意一个输入为高，输出就为高。如果选手的个数少于输入的

个数，可以将未使用的引脚接地并忽略它们。

现在我更清楚“按钮阻塞器”到底应该是什么了。我认为它应该是另一个逻辑门。它应该这样描述自己的功能：“如果只有来自一个按钮的输入，我就让它通过。但是如果有另外的输入，我就不让它们通过。”

但是，在选择门电路之前，我需要确定锁存器的种类。我可以买一个现成的锁存器，它收到一个信号时会导通，再收到一个信号则形成闭锁，但是包含锁存器的芯片通常不只有这种简单电路所需要的功能。因此我仍要使用双稳态模式的 555 定时器。它们需要的连接很少，工作原理简单，能输出足够大的电流来点亮 LED。唯一的问题是，双稳态 555 定时器需要满足以下两点。

- ❒ 低触发输入产生高电平输出。
- ❒ 低重置输入产生低电平输出。

那么，每位选手的按钮都需要产生低脉冲而非高脉冲，这样就能满足定时器的要求了。

最后，图 4-117 展示了简化的电路图。我要把 555 定时器引脚的正确位置画出来，所以就不得不微微移动元件，使线路的交叉最少，但这仍然符合逻辑，基本设想是一致的。

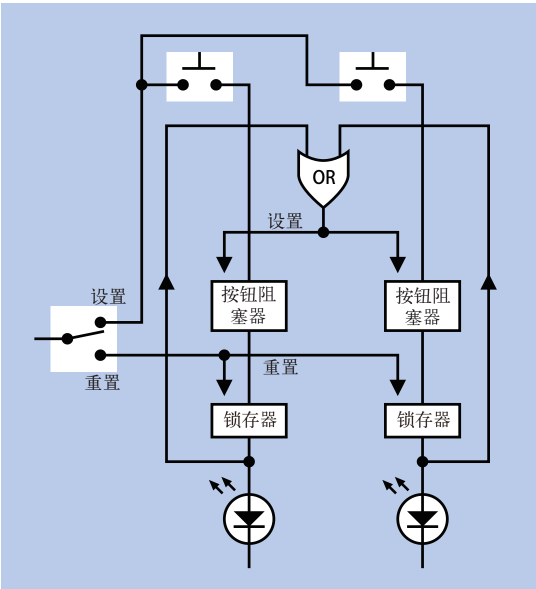


图 4-116　加入或门，将两名选手的电路互相隔离

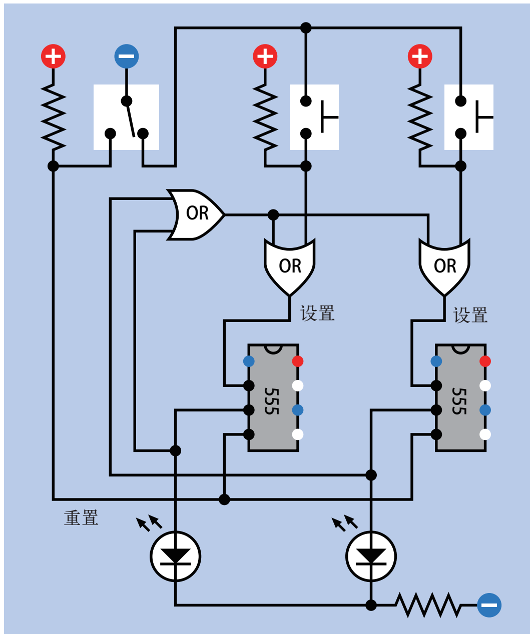


图 4-117　初步的逻辑电路图。定时器上的蓝色引脚为低电平，红色引脚为高电平，白色引脚不相关

由于空间不够，我无法添加正负电符号，用它们表示定时器的引脚处于何种状态，所以我用红

色圆圈表示引脚上为高电平，蓝色圆圈表示引脚上为低电平。黑色圆圈表示引脚状态可能改变，白色圆圈表示这些引脚的状态不重要，可以不连接。

搭建电路之前，请回顾一下电路的理论，因为这是最后一步了，要确保没有错误。需要注意的一个重点是，555 定时器的触发引脚需要低输入才能产生高输出。这意味着任何选手按下按钮时，按钮都必须产生流过电路的低电流。

这有一点违反直觉，所以我在图 4-118、图 4-119、图 4-120 和图 4-121 中分四步把电路形象化，阐明它的工作方式。

第 1 步中，节目主持人的开关处于重置模式。定时器重置引脚上的低电压使这两个引脚产生低输出。这些输出使 LED 保持熄灭状态，并进入 1 号或门。因为输入均为低，所以或门的输出为低，但是 2 号和 3 号或门忽略低输入，因为它们各有一个输入为高电平，由按钮旁的上拉电阻器提供。请记住，或门的任何一个输入为高，它的输出就为高。而且，只要双稳态模式的定时器触发引脚上为高电压，定时器就不会被触发。所以电路是稳定的。

第 2 步，节目主持人提出了一个问题，把开关拨向右侧，为选手的按钮提供电源（低电压）。但是，还没有选手应答，所以上拉电阻器将电路保持在稳定状态，定时器输出为低。

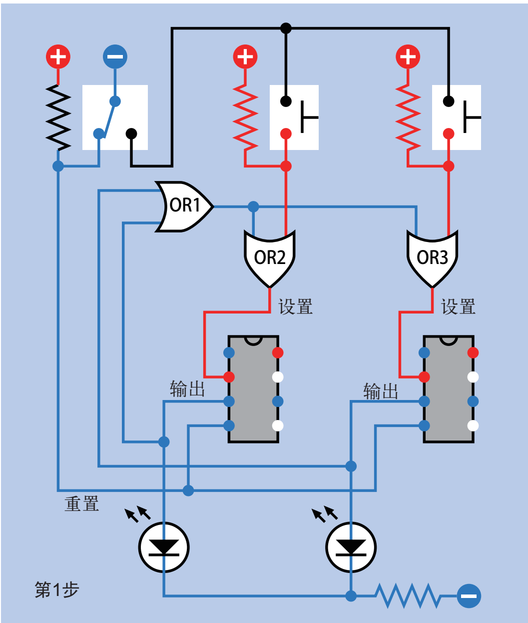


图 4-118　演示电路第 1 步，重置模式

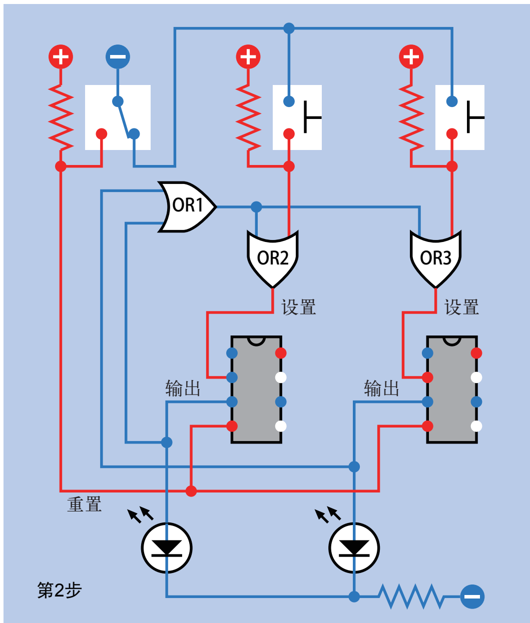


图 4-119　演示电路第 2 步。选手的按钮被激活，但是还没有人按下按钮

第 3 步，1 号选手按下了左侧的按钮，向 2 号或门输出低脉冲。由于 2 号或门拥有两个低输入，所以它的输出变为低电平。低脉冲传递到左侧定时器的触发引脚上，但是元件并不会即刻应答，而定时器还未处理该信号。

第 4 步，几微秒后，定时器处理了低输入信号，产生高输出脉冲，点亮 LED，接着脉冲回到 1 号或门。由于 1 号或门具有高输入，所以它也会输出高电平，进入 2 号和 3 号或门的输入，从而使 2 号和 3 号或门的输出变为高电平。因此，两个定时器的触发引脚都有高电平输入，任何选手按下的按钮都会被忽略，因为 1 号或门继续向电路提供高电平。

❐ 请记住，当 555 定时器处于触发模式时，触发引脚上的低输入会使其输出高电平，而该输出会一直保持为高电平，即使触发引脚也变为高电平，也不会改变。

❐ 使 555 定时器结束高输出的唯一条件就是重置引脚上的低电压。此情况只会在主持人将开关拨回重置模式时发生。

只有一种情况会让这个快乐的情景变得尴尬。如果两个选手完全同时按下按钮，会发生什么呢？在数字电子世界中，这种事情发生的概率极其低，但是如果真的发生了，两个定时器都会反应，两个 LED 都会亮起，表示有平局出现。

在 Jeopardy! 节目中，从未有平局出现，确实从未有过！我猜想，如果节目采用的电子系统得到同时来自两名选手的应答，它可能出现随机特性，只选择其中一名。当然，这只是猜测。

为了说明两名选手使用的电路如何升级容纳更多的选手，我在图 4-122 中绘制了简化后的三名选手的电路图。电路可以无限扩展，唯一的限制是 1 号或门的可用输入个数。

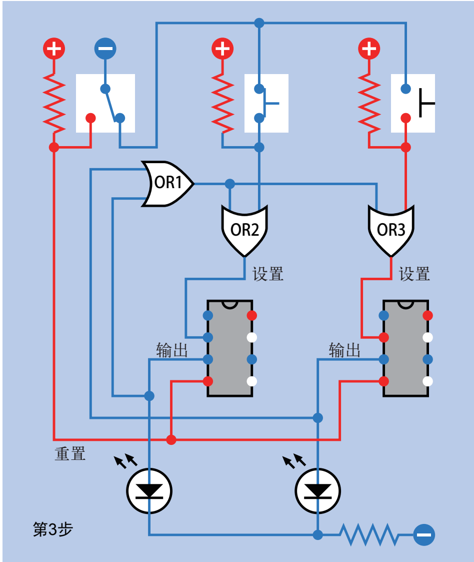


图 4-120　演示电路第 3 步。左侧选手按下了按钮，但是定时器还未作出应答

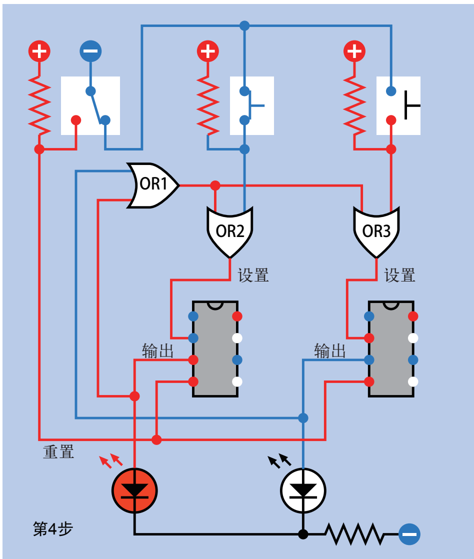


图 4-121　演示电路第 4 步。左侧选手的动作通过电路阻止了右侧选手

在面包板上搭建电路

图 4-123 中，我利用或门芯片修正了电路，使电路布局尽可能接近面包板布局，这样你就容易搭建了。图 4-124 展示了电路的面包板布局，图 4-125 展示了元件取值。

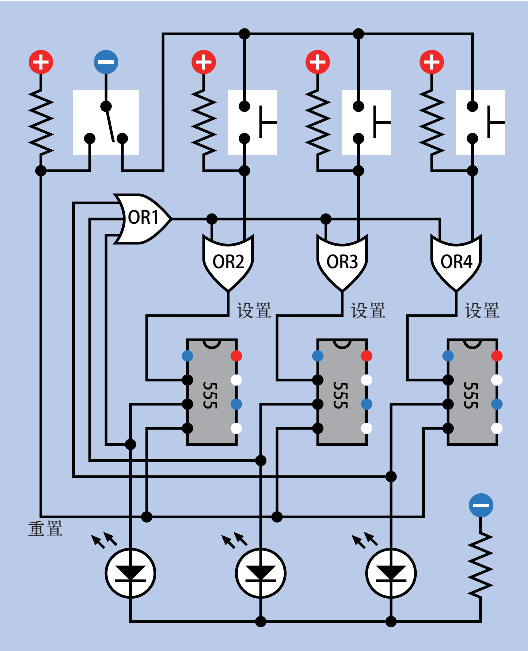


图 4-122　向电路中增加选手很容易

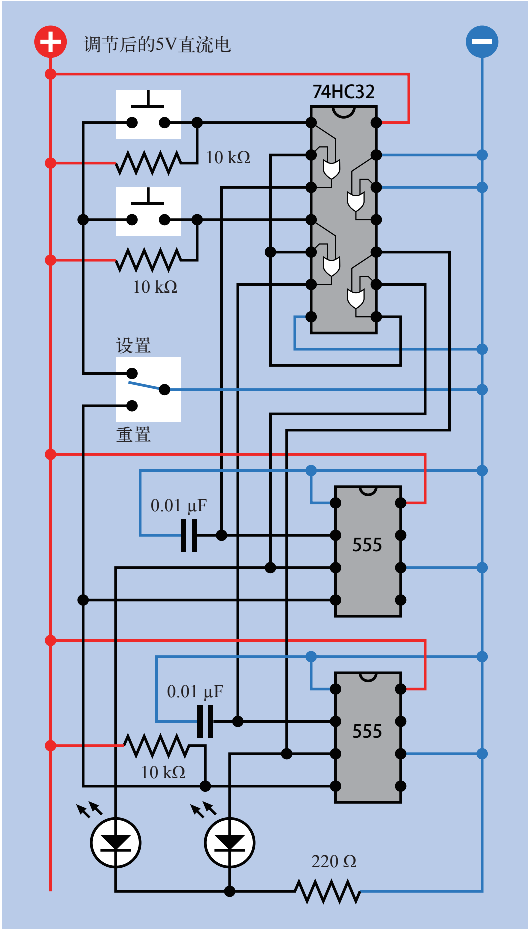


图 4-123　用四 2 输入或门重新绘制两名选手的电路图

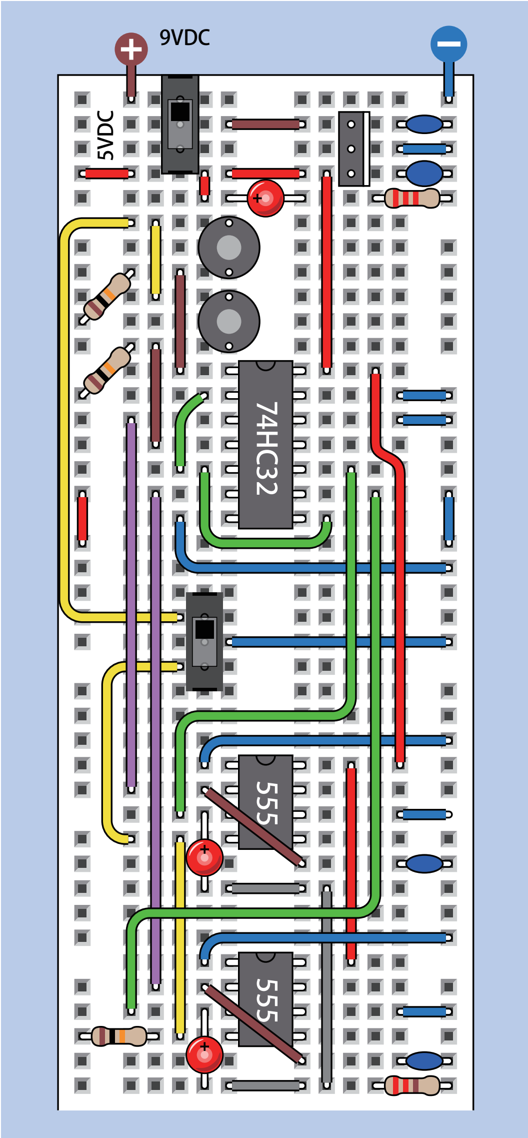


图 4-124　面包板布局，与电路图等价

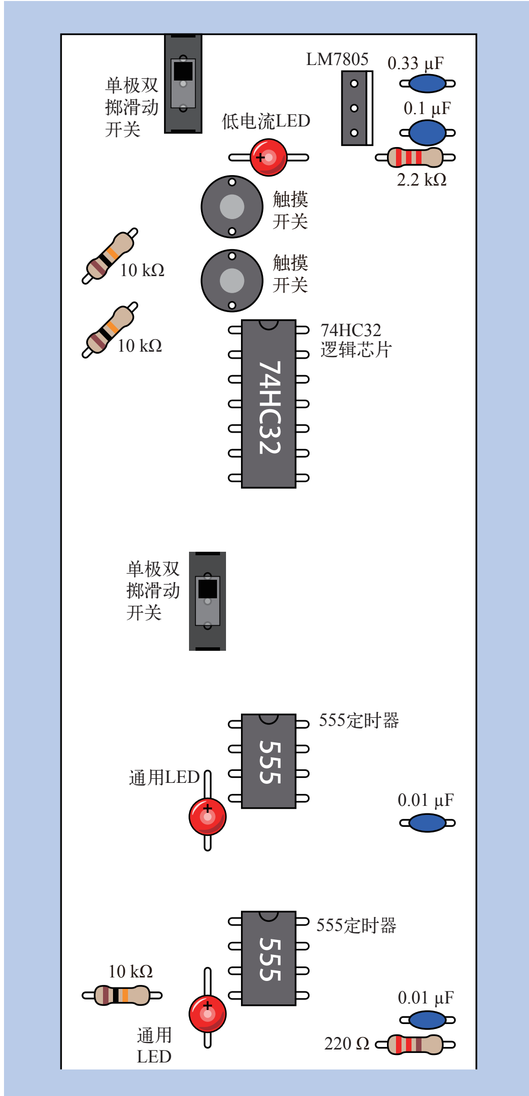


图 4-125　面包板布局的元件取值

因为我用到的逻辑门只有三个或门，所以只需要一片逻辑芯片：74HC32，它包含四个 2 输入或门。（我将第四个或门的输入接地了）。芯片左侧两个或门的作用等同于简化电路图中的 2 号和 3 号

或门，而芯片右下角的或门相当于 1 号或门，它的输入来自每个 555 定时器的 3 号引脚。如果你备齐了所有元件，就应该能够迅速搭建好电路并进行测试。

你可能会注意到，我在每个 555 定时器的 2 号引脚和接地负极之间都加入了一个 0.01μF 的电容器。为什么呢？因为不加电容器测试电路时，我有时会发现，单纯拨动主持人开关就能触发一两个 555 定时器，甚至无需按下按钮。

起初这让我很困惑。没有人操作时，定时器是怎么触发的？也许它们是对主持人开关中的“弹跳”作出响应。弹跳指拨动开关时，开关触点小而迅速的振动。果然，问题正在于此，小电容器解决了这个问题。它们可能还轻微降低了 555 定时器的响应速度，但是还不足以造成问题，因为人类的反应更慢。

对于按钮，它们是否“弹跳”则无关紧要，因为每个定时器都会在第一个脉冲信号出现时自锁，并忽略之后的任何信号。

你可以试验搭建电路，拆除 0.01 μF 的电容器，来回拨动主持人开关数次。因为我建议你使用的是小而便宜的滑动开关，所以你应该会见到很多次“误报”。在实验 24 中，我将更详细地讲解开关弹跳的问题以及消除弹跳的方法。

功能增强

搭建好面包板电路之后，如果你想做固定电路，我建议你将它扩展成至少四名选手可以参加的形式。这需要四输入或门，显然应该选择 74HC4078，因为它最多可以允许八个输入。只需将多余的输入引脚连接到接地负极即可。

或者，如果你已经拥有几片 74HC32 芯片，而且并不想购买 74HC4078，也可以把单片 74HC32 中的三个或门连在一起，使它们的功能与四输入或门相同。请观察图 4-126 所示的简单逻辑电路，图中有三个或门，并要记住，只要或门有一个输出为高电平，则其输出为高电平。

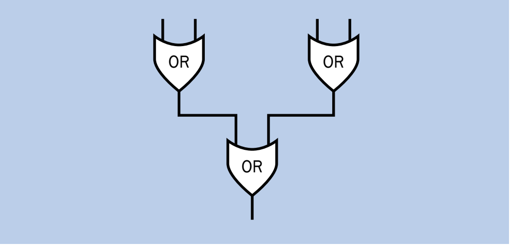


图 4-126　三个 2 输入或门可以模仿一个 4 输入或门

思考了这个问题以后，你能否想出如何组合三个 2 输入与门，才能让它们代替一个 4 输入与门？

四名选手的竞赛电路当然需要再添加两个 555 定时器、两个 LED 和两个按钮开关。

至于电路如何设计，我将把这个问题留给你。先画出简化的电路图，只画出逻辑符号。然后转换为面包板布局（这是最困难的部分）。我有一个建议：画草图时，铅笔、纸和橡皮比电路设计软件或平面设计软件更为迅速。

实验 23：翻转和弹跳

目前为止，我已经在三个实验中使用了双稳态模式的 555 定时器。现在，是时候见识一下真正的触发器了，我要解释它们的工作原理。我还将展示触发器如何处理我在实验 23 中提及的现象：开关弹跳。

当开关从一个位置拨动到另一个位置上时，它的触点会短暂振动，这就是我所说的"弹跳"，在数字元件快速响应的电路中，弹跳是一个问题，因为元件会将每次微小的振动理解为单独的输入。例如，如果你将按钮开关连接到计数器芯片的输入引脚上，按一下按钮，计数器可能会记录 10 次或更多的输入脉冲。图 4-127 展示了实际的开关弹跳电压波形。

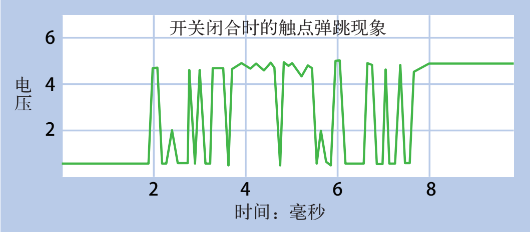


图 4-127　开关闭合时，由触点振动产生的电压波动（数据获取自 Maxim 集成电路公司）

防开关弹跳有多种方法，使用触发器可能是最基本的一种。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 74HC02 逻辑芯片 1 枚、74HC00 逻辑芯片 1 枚
- ❒ 单极双掷开关 2 个
- ❒ 低电流 LED 3 个
- ❒ 电阻器：680 Ω 2 个、10 kΩ 2 个、2.2 kΩ 1 个
- ❒ 电容器：0.1 μF 1 个、0.33 μF 1 个
- ❒ LM7805 稳压器 1 个

将元件安装在面包板上，如图 4-128 所示。图 4-129 展示了等效电路图，而图 4-130 展示了元件取值。接通电源后，底部的一个 LED 会点亮。

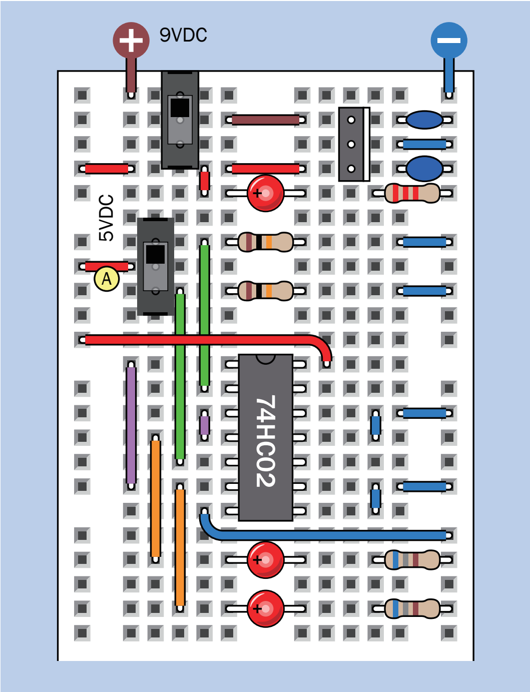


图 4-128　用或非门搭接的面包板触发电路

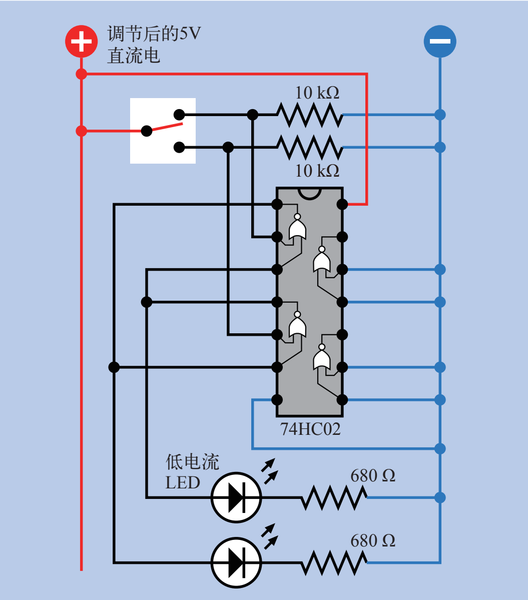


图 4-129　用或非门搭接的触发器电路

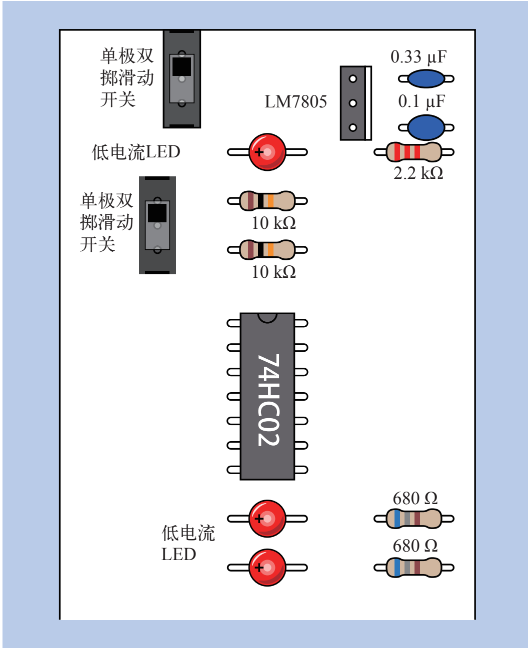


图 4-130　面包板或非门触发器的元件取值

现在我希望你做一点奇特的事情。请断开图 4-128 中编号为 A 的导线，只需把它拔出面包板即可。如果参考图 4-129 中的电路图，就会发现你断开了连接到开关一极的电源，只留下两个或非门，它们只与各自的下拉电阻器相连。

你可能会吃惊地发现，LED 仍然亮着。

将导线插回面包板，把滑动开关滑到相反的位置，第一个 LED 会熄灭，而另一个 LED 点亮。再次拔出导线，而另一个 LED 依然点亮。

以下是关键信息。

- 触发器只需要一个初始输入脉冲（例如，来自开关输入）。
- 之后，触发器忽略该输入。

电路工作原理

两个或非门或两个与非门的组合可以作为触发器。

- 当双掷开关提供高电平输入时，使用或非门。
- 当双掷开关提供低电平输入时，使用与非门。

无论采用哪种方式，都需要用到双掷开关。

我已经三次提到了双掷开关（算上这次就是四次了），但是由于某些奇怪的原因，大多数入门教材都没有强调这一元件。刚学习电子学时，我曾绞尽脑汁地思索如何用两个或非门或两个与非门防止单极单掷按钮开关弹跳，最后才意识到这是做不到的。原因是，当电路通电时，需要告知或非门（或与非门）应该处于什么状态。它们的初始定位来自开关的两种状态之一。单极单掷按钮开关在未按下时无法提供初始状态，所以你需要使用双掷开关。（现在我已经提到五次了。）

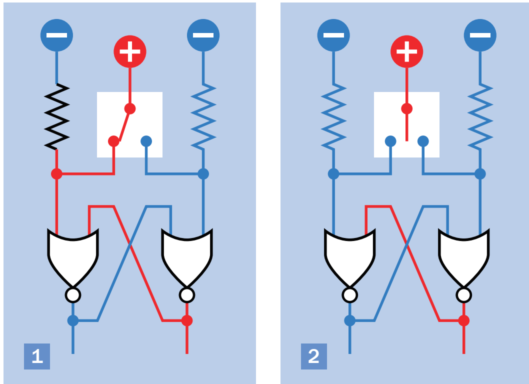


图 4-131　当开关拨到中心位置时，或非门的状态不变

使用或非门防弹跳

在图 4-131 和图 4-132 中，我绘制了多级电路图，以显示连接两个或非门的开关来回拨动时发生的变化。为了让你加深印象，我在图 4-133 中列出了真值表，展示了每种输入组合下或非门的逻辑输出。

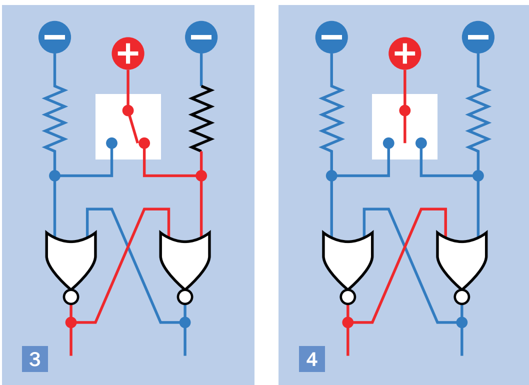


图 4-132　或非门的状态反转后，当开关拨到中心位置时，或非门仍保持状态不变

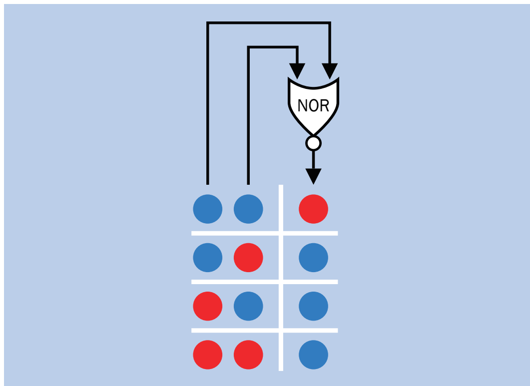


图 4-133　或非门的真值表

首先参考图 4-131，第 1 步中，开关向电路左侧提供高电压，压制下拉电阻器上的低电压，所以我们可以确定左侧的或非门有一个高电平逻辑输入。因为任何高电平逻辑输入都会使或非门产生低电平输出（如图 4-133 中真值表所示），所以产生的低电平输出到达右侧的或非门。该或非门上有两个低电平输入，它产生高电平输出，此输出又返回左侧的或非门。所以，在此配置下，电路非常稳定。

现在到了动脑筋的时候了。第 2 步中，假设你拨动开关，使它不接触任何一个触点。（或者假设

开关触点弹跳，不能形成牢固连接；或者假设你完全断开了开关。）没有来自开关的高电平，左侧或非门的左侧输入在下拉电阻器的影响下从高电平变为低电平。但是该或非门的右侧输入仍为高电平，而或非门只需一个高电平输入就能输出低电平，所以没有变化发生。也就是说，电路被锁存在此状态，无论开关是否断开。

参考图 4-133，如果开关拨到右侧，向右侧或非门的右侧引脚输出高电平，或非门识别到高电平逻辑输入，就将其输出转换为低电平。低电平输出到达左侧或非门的输入，使它的两个输入均为低电平，所以该或非门输出高电平，回到右侧或非门的输入。

以这种方式，两个或非门的输出状态互换。它们的状态翻转，然后锁存，即使开关触点断开也不变，如第 4 步所示。

如果开关弹跳现象严重，连接一直在两个触点间振动，电路将无法工作。只有当输出在一个连接点和无连接点之间交替时，电路才能工作。但是这通常就是使用单极双掷开关的情况。

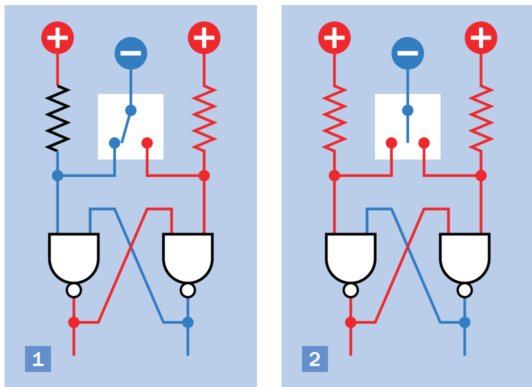


图 4-134　提供低电平的开关和带上拉电阻器的两个与非门可用作触发器

使用与非门防弹跳

图 4-134 和图 4-135 中的电路图展示了使用低电平开关和两个与非门时的一系列事件。为了加深你的印象，我在图 4-136 中列出了与非门的真值表。

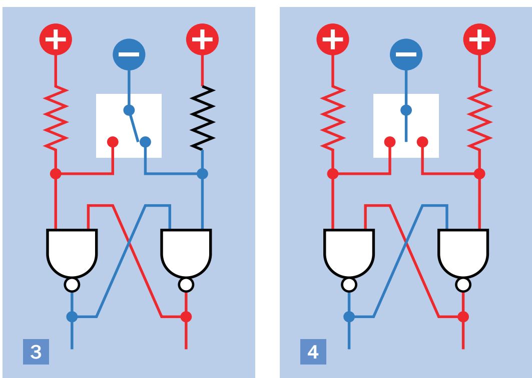


图 4-135　当开关与两个触点均不相连时，门电路的状态同样不改变

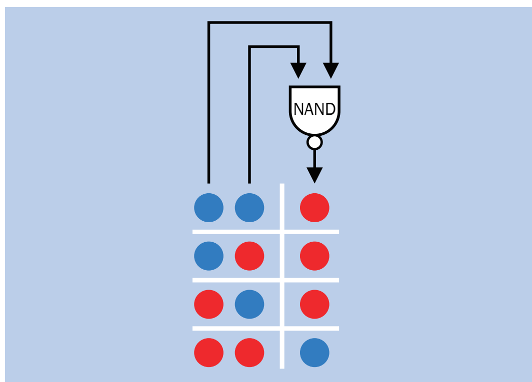


图 4-136　与非门的真值表

若想核实与非门电路的功能，你可以使用本实验部件列表中指定的 74HC00 芯片，自己进行测试。但是一定要注意：或非门芯片中的门电路和与非门芯片中的门电路，两者上下正相反。你需要改变面包板中一些导线的位置，因为这两种芯片不可互换。请参考图 4-83 和图 4-95 中的说明。

阻塞与定时触发器

或非门和与非门构成的电路是阻塞型触发器，得名的原因是开关强迫它立即响应，然后阻塞在此状态下。一旦需要防止开关弹跳，你就可以使用这两种电路（只要开关为双掷类型即可）。

定时触发器是一种更复杂的触发器，它需要你先设定每个输入的状态，然后输入时钟脉冲，使触发器响应。时钟脉冲必须平滑、精确，这意味着如果你用开关提供脉冲，开关必须经过防弹跳处理（可能要再用一个阻塞型触发器）。定时触发器的限制太多，我不愿在本书中使用它。它们增加了一定的复杂性，而这是我在入门教材中要避免的。如果你想了解关于触发器的更多知识，请参考 *Make: More Electronics* 中的详细内容，这个主题可不简单。

如果你想防止单掷（按钮）开关弹跳怎么办？这可是个问题！一种解决方案是购买专用芯片，例如 4490 弹跳消除器，其中包含数字继电器电路。安森美（On Semiconductor）公司生产的 MC14490 芯片内含六个电路，有六个单独的输入，每个输入内连一个上拉电阻器。但是该芯片比较昂贵，价格是 74HC02 或非门芯片的十多倍。如果你不用单掷开关而是使用更易防弹跳的双掷开关（或按钮开关），确实会方便很多。

你也可以将 555 定时器连接成触发器模式。我对 555 定时器的喜爱现在看来更有意义了。

实验 24：有趣的骰子

模拟投掷一两个骰子的电路已经出现了数十年，但是新的电路配置仍然层出不穷，本实验提供了学习更多逻辑电路知识的机会，最后你会做出一些有用的东西。我尤其希望向你介绍二进制编码，它是数字芯片的通用语言。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 555 定时器 1 个
- ❒ 74HC08 逻辑芯片 1 枚、74HC27 逻辑芯片 1 枚、74HC32 逻辑芯片 1 枚
- ❒ 74HC393 二进制计数器 1 个
- ❒ 触摸开关 1 个

- ❒ 单极双掷滑动开关 2 个
- ❒ 电阻器：100 Ω 6 个、150 Ω 6 个、220 Ω 7 个、330 Ω 2 个、680 Ω 4 个、2.2 kΩ 1 个、10 kΩ 2 个、1 MΩ 1 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 2 个、0.1 μF 2 个、0.33 μF 1 个、1 μF 1 个、22 μF 1 个
- ❒ LM7805 稳压器 1 个
- ❒ 低电流 LED 15 个
- ❒ 通用 LED 1 个

二进制计数器

我所见过的每个电子骰子电路的核心都是某种类型的计数器芯片，通常是十进制计数器，有 10 个解码输出引脚，按顺序一次激活一根。骰子只有六个面，但是如果你将第七根引脚连接到芯片的重置引脚上，计数器就会在计到六之后重启。

我的做事风格是不走寻常路，所以我决定不用十进制计数器。这一部分是因为二进制计数器可以满足我讲解二进制编码的要求。这样，电路的复杂性会略微增加，但是会丰富你的学习经历；当一切都完成时，你的电路将能模拟两个（而不只一个）骰子的投掷，芯片数量适中，电路仍能安装在面包板上。

我选择的计数器芯片应用很广，其型号为 74HC393，实际包含两个计数器，但是第二个计数器可以暂时忽略。引脚分配如图 4-137 所示。

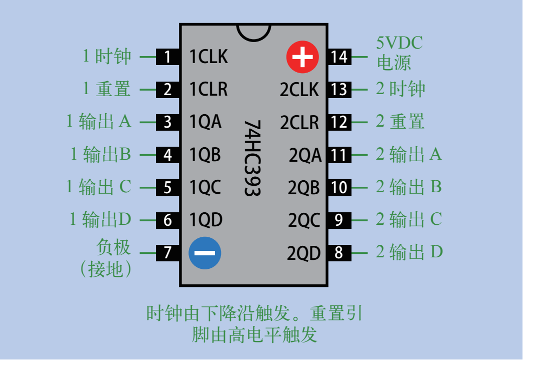


图 4-137　74HC393 二进制计数器的引脚功能

生产商有个奇怪的习惯，用尽可能少的字母表示数字芯片的引脚功能。这些神秘的缩写可能难以理解。例如，在图 4-137 中，芯片上的引脚标记是我在德州仪器提供的数据表上发现的。（而更令人迷惑的是，其他生产商使用的缩写各不相同，没有确切标准。）

我在芯片周围用绿色字清晰地标出了引脚功能。前面的数字指 1 号或 2 号计数器，它们分别封装在芯片内。

计数器测试

了解芯片的最佳方式就是在实验台上进行实验。图 4-138 展示了电路图，而图 4-139 展示了面包板电路布局。图 4-140 展示了面包板电路的元件取值。

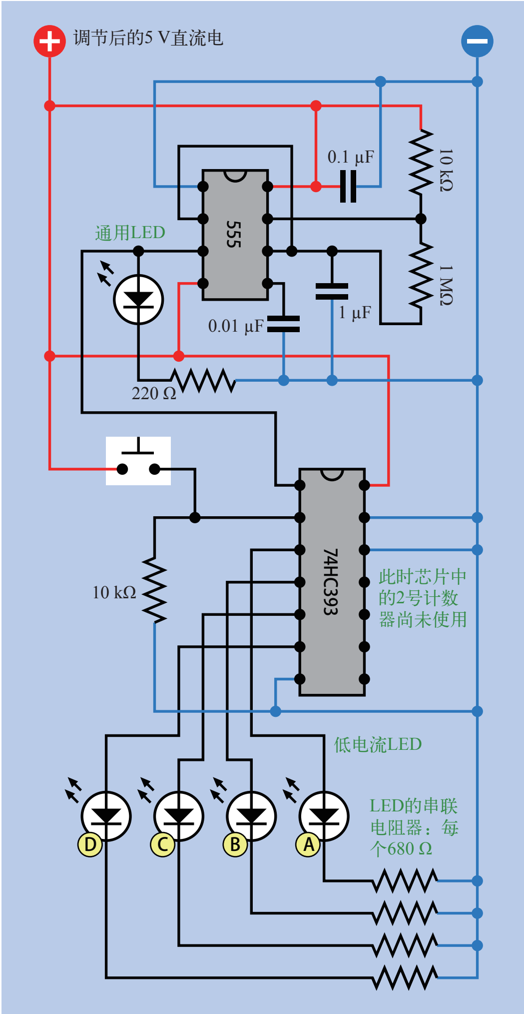


图 4-138　观察 74HC393 二进制计数器输出和重置功能的电路图

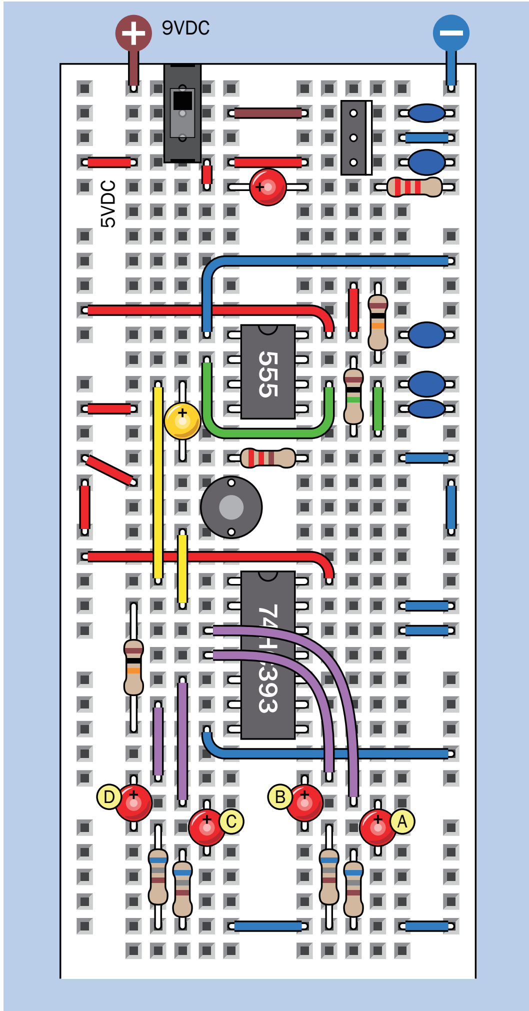


图 4-139　面包板测试电路

请记住以下几点。

❒ 电路中有一个 5 V 逻辑芯片，不要遗漏稳压器。

❒ 注意，在定时器的供电引脚和地之间有一个 0.1 μF 的电容器，它的作用是抑制定时器产生的小电压尖峰。如果不加以控制，它们会使计数器工作混乱。

我指定的电容器和电阻器将在 0.75 Hz 下与定时器配合运行，也就是说，一个脉冲的开始和下一个脉冲的开始之间的间隔会略长于一秒。你可以通过观察与定时器输出相连的黄色 LED 来观察这个现象。（如果黄色 LED 没有如此闪烁，那么电路某处就有接线错误。）

编号为 A、B、C、D 的四个红色 LED 显示计数器的输出状态。如果电路连接正确，它们将按照图 4-141 所示的顺序亮起，图中的黑色圆圈表明 LED 熄灭，红色圆圈表明 LED 点亮。

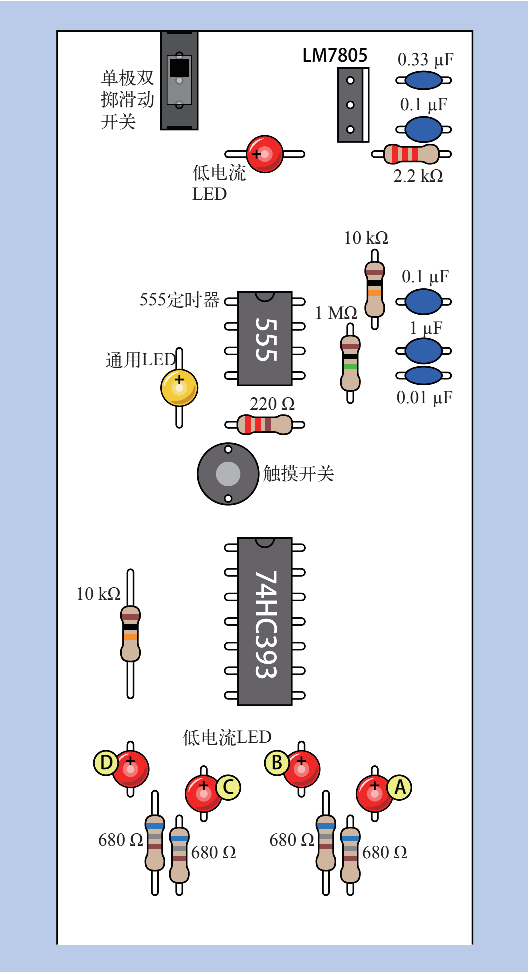


图 4-140　面包板电路各元件取值

	D	C	B	A
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1

图 4-141　二进制计数器的完整输出序列

现在，我要向你介绍关于二进制和十进制运算的更多知识。真的有必要了解吗？是的，这非常实用。各种芯片，例如解码器、编码器、多路转换器和移位寄存器都使用二进制，而且二进制在任何数字计算机中都是最基础的元素。

基础知识：二进制编码

如图 4-141 所示，A 列中的 LED 每次熄灭时，B 列中的 LED 都会反转状态——由开到关，或者由关到开。每次 B 列中的 LED 熄灭时，C 列中的 LED 都会反转状态，以此类推。结果是：每个 LED 的闪烁频率都是它左侧 LED 的两倍。

LED 的组合代表**二进制数值**，即只用两种数字 0 和 1 表示的数值，如图 4-141 中的白色字体所示。相应的十进制数值用黑色字体写在了左侧。

你可以将 LED 想象为**二进制数**，也就是人们通常所知的**比特**。

二进制计数法则非常简单。最右侧的一列从 0 开始，然后加 1，再然后，因为只能用 1 和 0 计数，所以再想加 1 的时候，需要将此数位归零，把 1 加到左侧的数位上。

如果左侧的数位上已经有了 1，怎么办？将它变成 0，把 1 加到更左侧的数位上，以此类推。

最右侧的 LED 代表四位二进制数的**最低有效位**。最左侧的 LED 代表**最高有效位**。

上升沿、下降沿

运行电路时，请注意：最右侧的红色 LED 的每次变化（从亮到灭，或从灭到亮）都在黄色 LED 熄灭时发生。为什么呢？

大多数计数器都是**边沿触发**，即高脉冲的上升沿或下降沿到达芯片的时钟输入引脚时，都会推动计数器计入下一个数值。LED 的现象清楚表明 74HC393 由下降沿触发。在实验 19 中，我们使用了上升沿触发的计数器。你所使用的芯片种类取决于你的应用。

74HC393 计数器也有重置引脚，与实验 19 中的 4026B 芯片类似。

- ❒ 有的数据表将重置引脚描述为主复位（master reset）引脚，缩写为 MR。
- ❒ 有的生产商将重置引脚称为清零（clear）引脚，在数据表上缩写为 CLR。

无论名称如何，重置引脚都具有相同的功能。它迫使计数器的所有输出变为低电压——本例中为二进制数字 0000。

重置引脚需要单独的脉冲。但是，重置发生在脉冲开始时还是结束时呢？

让我们探究一下。如果你仔细搭建了电路，会发现重置引脚通过 10 kΩ 的电阻器保持在低电平，但是还有一个触摸开关，它直接将重置引脚连接到正极总线上。这样就压制住了 10 kΩ 的电阻器，强迫重置引脚保持高电平。

一按下触摸开关，所有的输出都会变暗，直到你松开开关，它们才会重新变亮。很明显，

74HC393 的重置引脚是由高电平触发并保持的。

系数

关闭电源，断开上拉电阻器和触摸开关与重置引脚（2 号引脚）的连接，用一根导线代替，如图 4-142 所示。原先的所有连接都画成了灰色。新添加的黑色导线从 D 输入将第四个数位连接到重置引脚上。图 4-143 展示了面包板上的连接方式，新添加的导线为绿色。

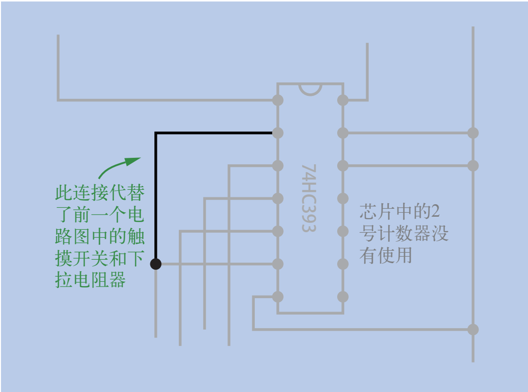
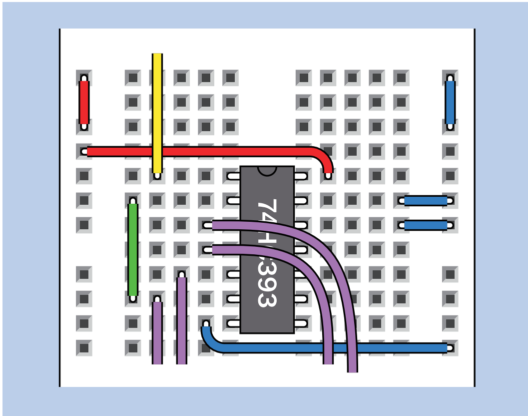


图 4-142　向定时器添加导线，实现自动重置


图 4-143　面包板局部电路图。下拉电阻器、触摸开关和相关连接都已被移除，连入了绿色导线

你觉得将会发生什么现象呢？

再次运行计数器。它从 0000 开始计数，一直到 0111。下一个二进制输出应该是 1000，但是第四个数位一从 0 变成 1，重置引脚就检测到了高电平，强迫计数器变回 0000。

你能在计数器重置之前看到最左侧的 LED 闪烁吗？我表示怀疑，因为计数器在百万分之一秒内就会响应。

现在，计数器在自动重复之前会从 0000 计到 0111。因为二进制中从 0000 计到 0111 相当于十进制从 0 计到 7，所以我们现在有了**八分制**计数器。（以前它是十六分制计数器。）

假设你将重置导线从第四个数位移动到第三个数位，现在你就拥有了四分制计数器。

> 你可以很方便地为几乎任何四位二进制计数器重新接线，这样它会在 2 个、4 个或 8 个输入脉冲后重置。

在重复之前，计数器输出的状态数称为**系数**，通常简写为“mod”。8 系数计数器在接收八个脉冲后重复（计数 0~7）。

转换为 6 系数

如何使我们正在研究的项目产生电子骰子的计数模式呢？我正在着手处理这个问题。由于骰子有六个面，所以我感觉可能需要重新给计数器接线，让它在六个状态后重复。

二进制编码表示的输出序列为：000、001、010、011、100、101。（我们可以忽略 D 列的最高有效位，因为仅有六个状态，所以我们并不需要它。）我需要使计数器在输出十进制数字 5（即二进制数字 101）之后重置。

（为什么是十进制数字 5 而不是 6 呢？因为我们从 0 开始计数。本项目中，如果计数器从 1 开始计数就会方便许多，但它做不到。）

二进制数字 101 之后的输出是多少？答案是 110。

110 这个数字有什么与众不同之处吗？研究一下输出序列，就会发现 110 是这个序列中第一个由两个高位开头的数字。

我们应该怎样告诉计数器“当 B 列有一个 1，C 列也有一个 1 时，重置为 0000”呢？句中的“也”提供了线索。当且仅当与门的两个输入均为高电平时，它会输出高电平，这就是我们所需要的。

与门可以直接连入电路吗？当然可以，因为 74HC*xx* 芯片族的所有芯片都可以互相连通。在图 4-144 中，你会发现我加入了一个与门。当然，在面包板上搭建时需要添加合适的芯片：74HC08。它含有四个与门，而我们只需用到一个与门，因此除了连接电源以外，还必须将未连接的输入接地。这有一点麻烦，但我将进行一些添加和修改，同时展示具体的连接方法。（未使用的输出必须不加连接。）

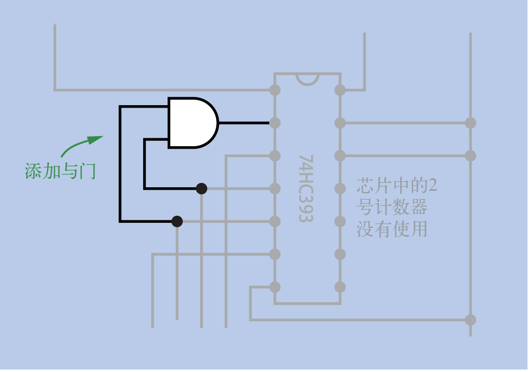


图 4-144　添加了一个与门用于调节计数器，使它只在六个输出状态中循环，而不是输出 16 个状态

同时，请记住这条重要信息。

你可以将逻辑芯片与计数器配合使用，通过找出输出状态的独特形式，改变计数器的系数，向重置引脚反馈信号。

不使用七段式显示器

我可以用七段式显示器从 1 显示到 6，作为骰子的显示器。但是有一个问题。计数器的循环是从 0 到 5，我找不到简单的方法，把二进制的 000 转换为七段式显示器上的 1001 转换为 2，以此类推。

可以让计数器跳过二进制的 000 吗？有可能，但是我不确定怎么做。或许可以使用输入与门，让信号反馈到时钟输入上，使计数器进入下一个状态？但是反馈信号随后会与正常时钟信号冲突，听起来会有很大麻烦。

无论如何，我都不希望在此项目中应用七段式显示器，因为它的视觉效果并不好。为什么不用 LED 来模仿骰子上的点数呢？点数序列如图 4-145 所示。

你能找到将计数器的二进制输出转换为按照上图图案点亮 LED 的方法吗？

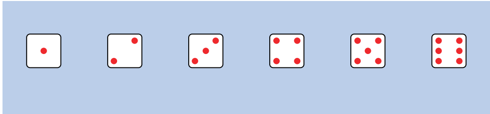


图 4-145　将由 LED 模仿的骰子点数图案

选择门电路

我将从最简单的选择方案开始。如果将计数器的输出 A（如图 4-138 所示）连接到代表骰子中间红点的 LED 上，效果将会很好，因为中间的红点只在表示数字 1、3、5 时点亮，表示 2、4、6 时则熄灭。这正是输出 A 的工作方式。

然后事情就有点棘手了。显示 4、5、6 图案时，我需要点亮一对对角 LED，而显示 2、3、4、5、6 时，还要点亮另一对对角 LED。如何做到呢？

图 4-146 展示了我的解决方法。你会发现我添加了两个逻辑门：三输入或非门和二输入或门。在它们旁边，我写出了二进制数字序列，以及每个数字在骰子上显示出的图案。

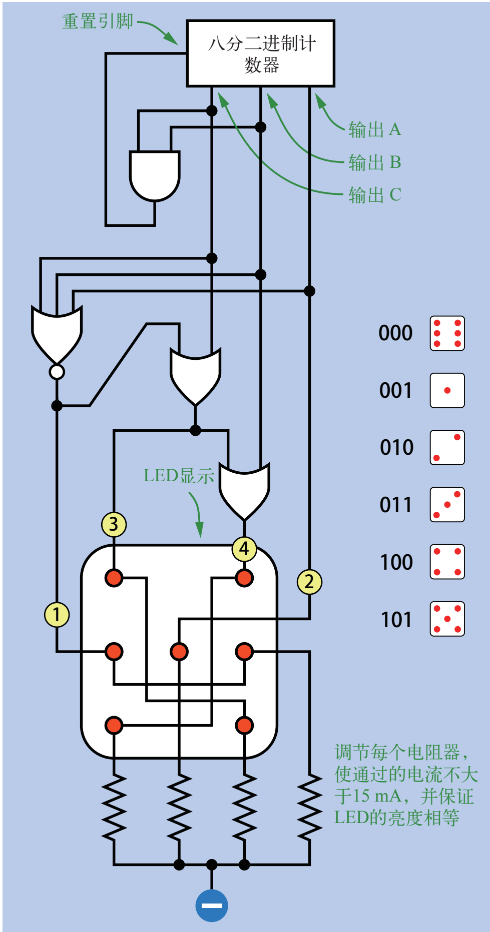


图 4-146　产生骰子点数图案的逻辑电路

为了实现这一切，我需要从图案 6 开始，此时计数器从二进制数字 000 开始计数。图案顺序并不重要，只要各个图案都有对应的数字编码即可，无论如何，它们都要被随机抽取。

图 4-147 展示了计数器的输出如何点亮不同的点数图案。为防表述不清楚，随着计数器从 000 增加到 101，我做了一系列快照，显示电路中的高电平和低电平状态。快照如图 4-148、图 4-149 和图 4-150 所示。

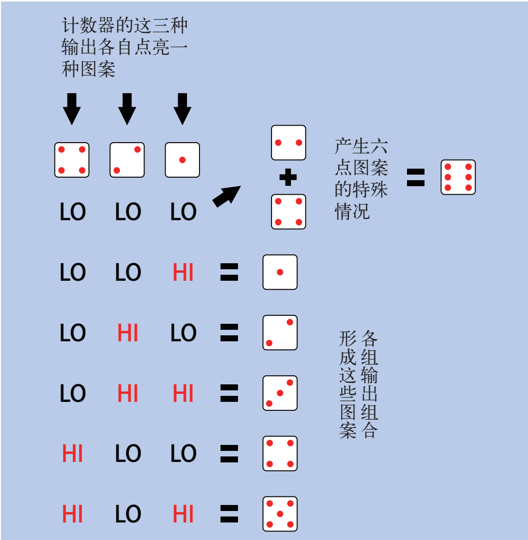


图 4-147　二进制计数器的输入如何点亮骰子点数图案

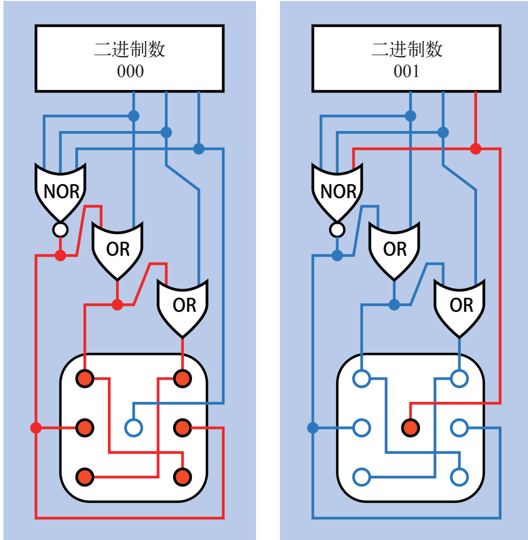


图 4-148　产生点数图案 6 和 1 的逻辑电路

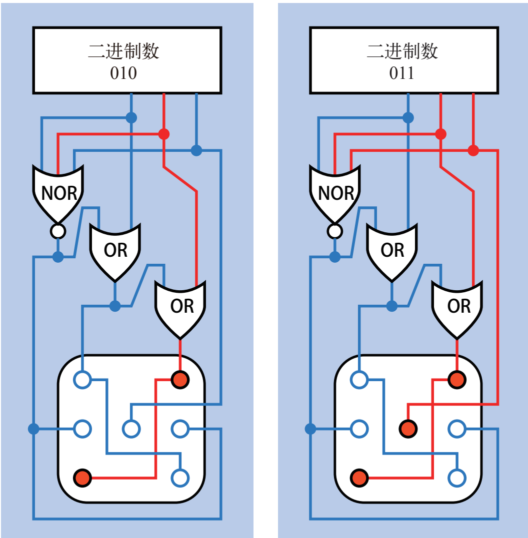


图 4-149　产生点数图案 2 和 3 的逻辑电路

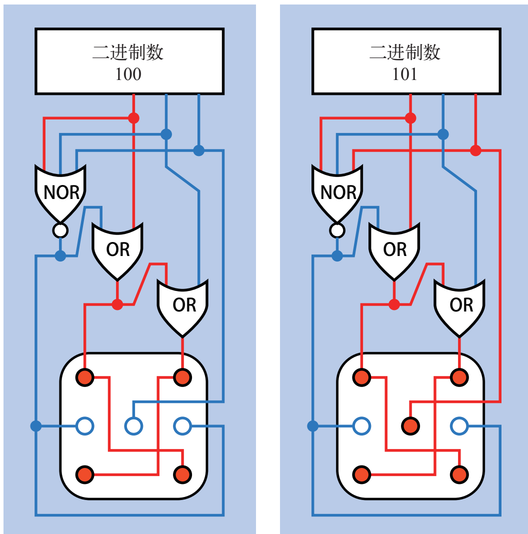


图 4-150　产生点数图案 4 和 5 的逻辑电路

我压缩了快照的大小，把两幅图并成一排，而且忽略了与门，因为它在 000~101 的计数范围内没有任何作用。只有当计数器试图进位到 110 时与门才会响应，此时它将计数器重置为 000。

你可能想知道我是如何设计出这样的门电路结构，使得计数器的输出转换为骰子的点数图案的，但我并不能确定地告诉你如何去做。当然要经过一定的反复试验，而这种逻辑电路的设计也包含一些直觉猜测，至少这种方法很适合我。设计电路也有更严密、正式的方法，但是我个人觉得这些方法不太容易。

完成的电路

图 4-151 所示的电路图由图 4-146 中的逻辑电路图衍生而来，图 4-152 展示了面包板电路。

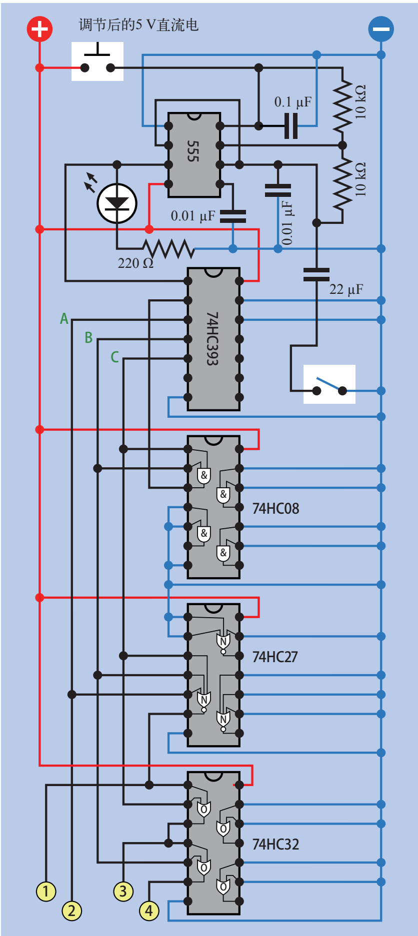


图 4-151　模拟掷骰子的完整电路

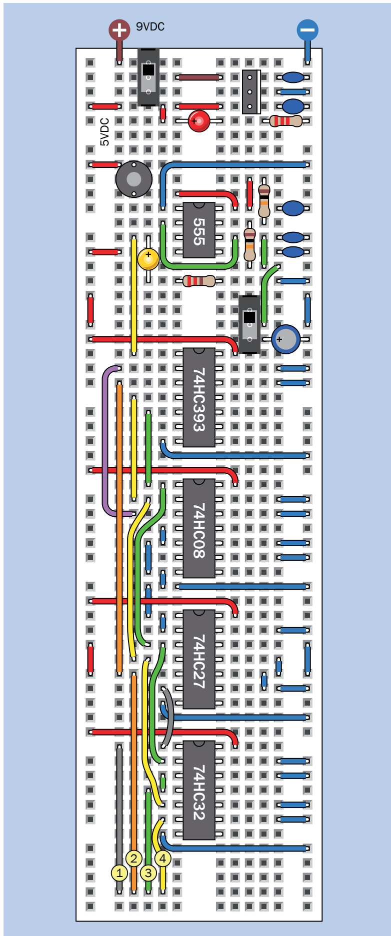


图 4-152　单骰子电路的面包板布局

图 4-153 展示了各元件取值。请注意，我更换了与 555 定时器连接的定时电阻器和定时电容器，现在定时器的工作频率约为 5 kHz。电路的构想是：定时器运行成百上千个周期后，在任意时刻停止它，这样就得到了任意的数值。

我还增加了一个可开关的 22 μF 电容器，它能使定时器缓慢运行（频率约 2 Hz），你可以用它向别人讲解计数器掷骰子的原理。

我没有画出面包板下半部分电路元件的取值，因为此处的元件只有芯片。这也是搭建逻辑电路的一个好处：不需要考虑为电阻器和电容器挤出空间，芯片和导线能完成大部分工作。

图 4-151 和图 4-152 中，电路底部有编号的输出对应图 4-154 所示的 LED 图案的输入。面包板上没有地方安装 LED 了，所以你可以再加一块面包板，或者在三合板或塑料板上钻几个孔，安装 LED。

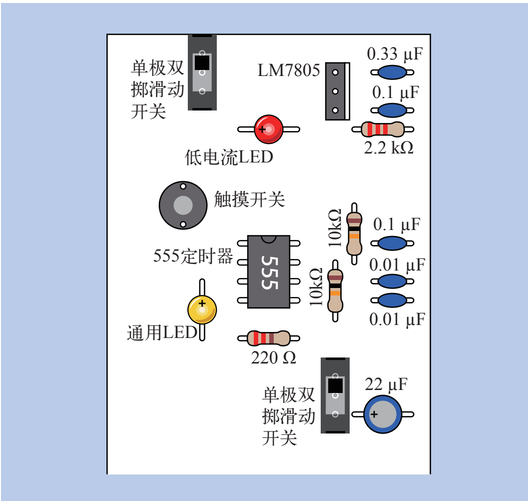


图 4-153　骰子模拟电路控制部分的元件取值

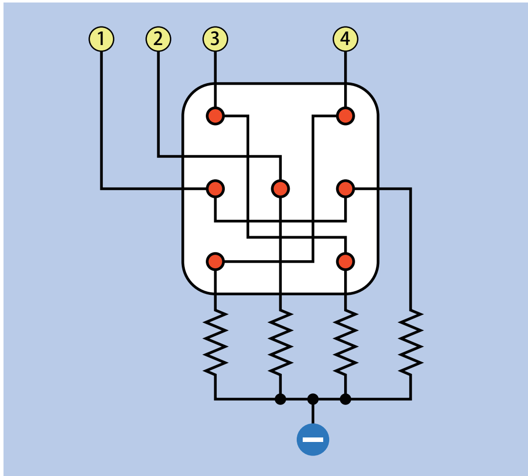


图 4-154　连接七个 LED（其中六个两两串联），显示单个骰子的点数图案

三对 LED 串联连接，因为逻辑芯片的功率不足以驱动一对并联的 LED。将 LED 串联所需的电阻器阻值较低。具体方法是：向一对 LED 两端施加 5 V 直流电压，将万用表调节为测量毫安电流，连接 220 Ω 的串联电阻器，观察测得的电流大小。如果目标为最大电流 15 mA，则超出了 HC 芯片的规定输出范围，可能需要连接阻值为 150 Ω 或 100 Ω 的电阻器，根据所使用的 LED 特性而定。

最后，通过 330 Ω 的电阻器向中心的 LED 施加 5 V 直流电压，将它的亮度与每对串联的 LED 相比较。你可能要增加电阻器阻值，使中心 LED 的亮度看起来和其他 LED 相等。

为逻辑电路中的 LED 通电，按下按钮，再松开，就得到了骰子的数值。

怎样才能知道获得的点数是随机的呢？唯一的确认方式是重复操作，记录每个数字出现的次数。

为获得较好的验证结果，需要运行约 1000 次。因为电路依赖人工按下按钮操作，所以没有使测试程序自动化的方法。我只能说，结果确实应该是随机的。

好消息

本电路用到的芯片数量比你之前用到的都多，但是，我要借用我最喜欢的电视节目 Futurama 的嘉宾 Farnsworth 教授的不老名言：“大家注意，有好消息！”

好消息是：你可以修改电路，模拟两个骰子而不仅是一个骰子的投掷，只要添加一些导线和 LED 即可，不需再添加芯片了。

与门、或非门和或门芯片中还有很多逻辑门没有用到，富余三个与门、两个或非门和两个或门。另外，74HC393 芯片中还有一个完全独立的计数器。这就是你所需要的工具。

问题是，如何创建不同于第一个序列的第二个随机数序列呢？难道要增加一个 555 定时器，让它以不同的速度运行吗？

我不喜欢这个想法，两个定时器会同相、反相运行，有些数值组合的出现次数会更多。如果第一个计数器从二进制 000 计到 101，然后触发第二个计数器从 000 计到 001；第一个计数器再次进行 000 至 101 的循环，再触发第二个计数器进位到 010，以此类推，这样就好多了。

第二个计数器的运行速度是第一个计数器的六分之一，但是如果速度足够快，还是无法看清点数图案。这种设置的巨大优势在于，所有可能的数值组合都会显示相同的次数，因此它们掷出的概率应该大致相等，就像你掷两个真正的骰子一样。

我为什么说“大致相等”呢？因为计数器从二进制 101 重置为二进制 000 时，有很小的时间延迟。但是如果左侧的计数器运行速度为约 5 kHz，小于百万分之一秒的延迟可以忽略不计。

计数器链锁

最后一个问题是：第一个计数器到达 101 并重置回 000 时，如何使第二个计数器进位？

很简单，考虑一下当第一个计数器的输出从 011 变成 101，再变成 110（重置为 000 之前一瞬间出现的最后一个值）时发生了什么：输出 C 到达高电压后，迅速降低。

第二个计数器进位所需的时钟输入信号是什么呢？你知道，是高脉冲的下降沿。你只需要将第一个计数器的输出 C 连接到第二个计数器的时钟输入引脚。芯片的工作方式的确如此，因此计数器输出脉冲的下降沿作为“进位”信号，使下一个计数器进位。

图 4-155 展示了掷两个骰子的电路图。我没有再画一幅面包板电路图，因为你应该能自己完成新的接线，它几乎就是已经搭建好的电路的镜像，但是请不要忘记将导线向下移动一排小孔，给每个芯片的供电导线留出空间。

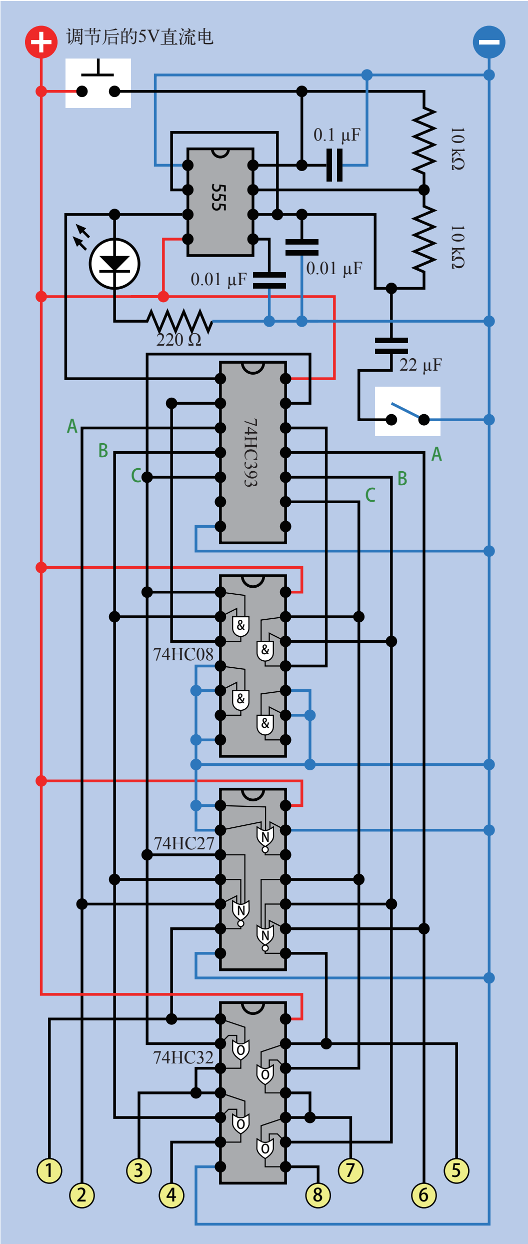


图 4-155　投掷两个 LED 骰子的完整电路

深入探究

电路可以简化吗？我在开始时提过，十进制计数器比二进制计数器需要的逻辑电路更简单。十进制计数器不需用与门把系数变为 6，因为它的第七根输出引脚可以直接连回重置引脚。

但是，如果你想掷两个骰子，就要用到两个十进制计数器，也就是两片独立的芯片。而且，你还需要两片芯片来驱动两个显示器。想知道原因，请在网上查找“电子骰子”的原理。此时，你应该能看懂 Google 图片搜索显示的电路图了。

我能想到的唯一简化方法是用两个二极管代替每个或门。网上给出的电路通常采用这种方法，但是这样会使信号接连通过两个二极管，从而使电压下降到不太可靠的程度。

减速问题

在本书的第 1 版中，掷骰子电路还有另一个很好的特性。当你把手指从“运行”按钮移开时，点数图案的显示速度逐渐减慢，最终停止。这个特性延长了最终结果的等待时间。

这个特性通过将一部分电源分离给 555 定时器实现。定时器“一直开启”，但是通向其 *RC* 网络的电压在使用者松开“运行”按钮时即切断。此时，一个大电容器缓慢向 *RC* 网络放电，随着电压的降低，定时器的速度也逐渐减慢。

一位名叫贾斯明·帕特里的读者给我发邮件说，当他使用电路时，数字 1 出现实在过于频繁，他怀疑这个现象与减速特性有关。

贾斯明是一位视频游戏设计师，他对随机性的理解比我更深刻。他有礼貌且耐心，懂得自己所谈论的话题，而且似乎有兴趣帮助解决他所发现的问题。

他给我发送了一些图表，显示了电路模拟出的每个数字的相对频率，我不得不承认，问题确实存在。我提出了很多可能的解释，但是结果都不对。最后，贾斯明成功地证明了一点：中心的单个 LED 功耗比周围的六个 LED 低，因而定时器在电压临界时的运行时间略长。这就增加了定时器在该时间段停留的可能性。

最后，贾斯明提出了他的替代电路：增加一个 555 定时器，让两个定时器的输出通过异或门。他还成功证明了这种方式可以减少一个数字过多出现的情况。我很高兴有读者能从我的书中获得这么多知识，他还拥有发现错误并改正错误的能力。

在新版本中，我略去了第 1 版中引起问题的减速电容器，但是我没有采用贾斯明的电路，因为那十分复杂，单个骰子就需要两片 555 定时器和一个异或门。他还使用了二极管，而我会用或门代替，而且面包板上的空间也不够。

获得贾斯明许可后，我会把他的电路免费发送给向我登记注册的读者（遵照前言说明的步骤，请参考我向你反馈一节）。此处我很难把它印出来，因为需要完全重新画图，适应两列式排版结构。

减速电路的替代方案

你会想，一定有更简便的方法减慢显示速度，也不会影响随机性。我上网查询时，发现有人使用 NPN 型晶体管，让它的射极连接到定时器的 7 号引脚，基极和集电极之间连接电容器，这样切断电源后，晶体管的输出会逐渐减弱。好几个人都在自己的骰子电路中应用了相同的方法，但是，我怀疑这种配置也会出现贾斯明发现的问题。

我也见过与我的电容器配置完全相同的电路（例如 Doctronics 网站上的电路）。我认为它们一定会出现我所描述的问题。

我的最终答案可能会让你失望：我不知道有什么方法，能够不添加元件增加电路的复杂度，又达到减速的效果。

但是，就在本书的正文部分结束之前，我的朋友兼核查员费德里科 • 杨松建议提出了建议：可以使用单独的稳压器给 555 定时器供电，使其与电路其余部分的能量波动隔离。我喜欢这个想法，但是在本书出版之前已经没有时间付诸实践了。

我利用 PICAXE 微控制器搭建了完全不同的骰子电路，但是发现该电路也有自己的随机性问题，因为芯片内置的随机数发生器并不完美。

在实验 34（本书的最后一个实验）中，你会发现我用 Arduino 处理器创建了另一个骰子模拟电路。但是我仍要依赖它的内置随机数发生器，我也怀疑它能否产生均匀分布的数字。

随机性的问题并不简单。在与贾斯明 • 帕特里通信后，我对这个问题有了更加浓厚的兴趣。我在 *Make: More Electronics* 一书中详细探究了这个问题，并在 *Make:* 杂志（第 45 卷）与亚伦 • 洛格（Aaron Logue）合作发表了一篇专栏文章。亚伦自己运行一个小网站，展示自己制作的项目。他向我

介绍了这么一个思路：使用反向偏置晶体管产生随机噪声，再使用伟大的计算机科学家冯·诺依曼的算法进行处理。我认为这将十分接近完美的随机数发生器，但是芯片总数将大大增加。

所有的优化方法都超出了入门教材的范围。如果读者**真的有办法**简洁地增加骰子电路的减速效果，请给我发送邮件。我的收件箱一直开启，一定会看到你的信件。

同时，我还收录了几张制作好的骰子电路照片。图 4-156 收录在 2009 年的第 1 版中。图 4-157 展示了我在 1975 年前后搭建的电路，当时我阅读了唐·兰开斯特（Don Lancaster）所著的 *TTL Cookbook* 一书。这本书非常神奇，我学到了使用 74xx 逻辑芯片的方法。四十年后，LED 仍能随机点亮。（至少我觉得它们是随机的。）

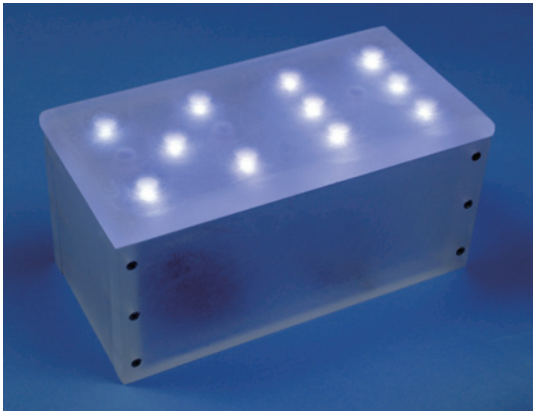


图 4-156　这个电子骰子显示器使用直径 10mm 的 LED，安装在磨砂聚碳酸酯塑料盒中

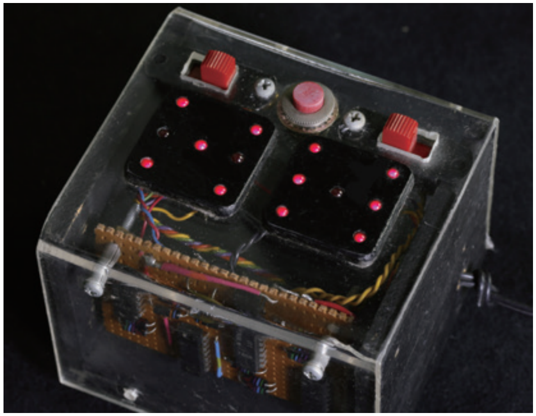


图 4-157　1975 年前后搭建的电子骰子电路，外壳由透明合成树脂和涂黑的三合板做成

5 第 5 章 接下来做什么

现在，我们可以向各个方向扩展了。以下是一些可能的方向。

音频：这是一个很广阔的领域，包含各种业余爱好者项目，例如放大器，还有用来调整吉他的声音的“跺脚箱”。

电磁：虽然还未提及，但是这个领域有很多非常有趣的应用。

射频设备：任何接收或发射无线电波的设备，从超级简单的 AM 收音机开始探索。

可编程微控制器：单芯片上的微型计算机。你在台式计算机上编写一段程序，再将它下载到芯片中。程序命令芯片执行一系列步骤，例如接收传感器的输入，待固定的时间间隔，然后向电动机发送输出信号。常用的控制器包括 Arduino、PICAXE、BASIC Stamp。

我没有足够的版面来完全展开所有的话题，所以我要做的就是向你介绍每个领域中的几个项目。你可以决定自己对哪个项目最感兴趣，然后跳出本书的局限，阅读该领域专业的其他指南。

我还要给出一些建议，谈谈如何整理出有效率的工作区，阅读相关书籍、目录和印刷资料，并向着电子爱好者的世界逐步迈进。

工具、设备、元件和耗材

本章是讲解实验的最后一章，不需用到额外的工具或设备了。图 6-8 总结了所有的元件。第 6 章耗材一节给出了附加配件列表（主要为导线，用于实验 25、26、28、29 和实验 31）。

整理工作区

此时，如果你已经对制造硬件着迷，但还没有为你的新爱好分配固定的工作区，我可以给你一些建议。多年来，我尝试过了各种选择，要说出的最重要建议是：不要搭建工作台！

很多电子学爱好者书籍建议你购买 2×4 英尺的三合板工作台，就好像工作台必须定制，必须满足尺寸和形状的严格要求似的。我感到难以理解，因为对我来说，尺寸和形状并不重要。我认为最

重要的问题是储存。

我希望工具和部件易得易取，无论它们是小晶体管还是一大卷导线。我可不想站起来穿过屋子，在架子上找来找去。

于是我得到了两个结论。

- 工作台周围需要有储存空间。
- 工作台下方需要有储存空间。

很多 DIY 的工作台下方储存空间都很小，甚至没有储存空间。还有人建议把架子设置成容易积灰的开放样式。我最小的工作台由一对双抽屉文件柜组成，中间搭接一块 3/4 英寸厚的三合板或胶木厨房台板。文件柜是储存所有物品的理想场所，不仅限于存放文件。你通常可以在旧货出售处和二手商店买到文件柜。

在用过的所有工作台中，我最喜欢一张老式的钢制办公用桌——20 世纪 50 年代生产的那种老家伙。它们太重，难以移动，外表也不美观，但是你可以从二手办公家具商那里以便宜的价格购到。它们的个头很大，非常耐用，经得起长期使用。办公桌的抽屉很深，推进拉出很容易，就像优质文件柜抽屉一样。桌子的最大优点在于它由钢制成，在你触碰对静电敏感的元件之前，可以用桌子给自己接地。如果你使用防静电手环，可以直接把它连接到钉在桌子一角的螺丝钉上。

在办公桌或文件柜的抽屉里应该放些什么呢？可以放一些文件，包括以下类别：

- 产品数据表
- 部件目录
- 自己绘制的草图和撰写的计划

每个抽屉的剩余空间可以用塑料储物盒填满。盒子里可以盛放不经常使用的工具（例如热风枪或大功率烙铁）和尺寸较大的元件（例如扩音器、交流适配器、项目盒、电路板，等等）。应该使用的储物盒长 11 英寸，宽 8 英寸，深 5 英寸，各边笔直。你在沃尔玛可以买到更便宜的盒子，但是它们的边缘通常为弧形，不能很好地利用空间。

我最喜欢的储物盒是 Akro-Mils 生产的 Akro-Grids 系列（如图 5-1 和图 5-2 所示）。它们非常坚固，有可选透明摁扣连接盒盖。照片的拍摄角度使盒子看起来似乎底部窄小，但实际并不是。你可以在网上下载完整的 Akro-Mils 产品目录，在线搜索零售商。你会发现 Akro-Mils 还销售式样繁多的部件盒，但是我不喜欢敞开的盒子，因为其中盛装的物品容易积灰。



图 5-1　Akro-Grid 储物盒内含凹槽，内部能够分隔成多个小间，方便部件储存。照片中这样高度的储物盒可以在文件柜抽屉里重叠放置三个

对于中等尺寸的元件，例如电位器、电源连接器、控制旋钮、拨动开关等，我喜欢储存在长 11 英寸、宽 8 英寸、深 2 英寸的储物盒里，分成四至六部分使用。你可以从 Michaels（工艺品商店）购买储物盒，但我更喜欢上网购买 Plano 牌的，因为它们的产品看起来构造更结实。最适合中等尺寸电子部件的 Plano 产品分类是渔具盒。

对于没有分隔、深度较浅的储物盒来说，型号为 Prolatch 23600-00 的盒子尺寸非常适合文件柜的抽屉，盒子的锁也非常牢固，你可以沿它们的长边摆上好几个盒子。如图 5-3 所示。



图 5-2 Akro-Grid 储物盒的盖子单独销售，它可以使盒内物品免遭灰尘侵袭。照片中的盒子较高，加上盖子的盒子可以在文件柜抽屉里重叠放置两个



图 5-3 Plano 储物盒没有分隔，可以存储导线卷或中等尺寸的工具。三个盒子摆在一起，可以恰好放在文件柜抽屉里

Plano 还卖一些设计精美的工具盒，你可以在工作台上放一个。它有小抽屉，你可以很方便地拿到螺丝刀、钳子等其他工具。因为大多数电子项目需要的工作区域也不过一平米见方，所以为工具盒腾出一点空间并无大碍。

如果你的书桌是钢制书桌，抽屉较浅，可以用其中一个放置印刷目录。不要因为可以在网上买到一切，就低估硬拷贝的作用。例如，Mouser 的目录有索引，在某些方面比在线搜索更有用，而且目录还被分成一些有帮助的类别。有很多次，我仅通过浏览就发现了自己从不知道的有用部件，这比在宽带网上一页页翻 PDF 快得多。现在，Mouser 仍然很慷慨，乐意向外发送两千多页的目录。McMaster-Carr 也会给你发送目录，但是你必须先从他们那里购买商品。那可能是世界上最全面、最翔实的工具和硬件目录。

现在大问题来了：如何储存所有这些微型部件，例如电阻器、电容器和芯片？我尝试了各种解决方法。最显而易见的方案是购买一盒小抽屉，每个抽屉都可以移动，这样你就可以把它放在桌面上，取用里面的物品。但是出于两个原因，我并不喜欢这种构造。首先，储存非常小的元件需要将抽屉再次细分，而分隔物并不牢固。其次，抽屉可以移动，就有不慎将物品撒在地上的风险。也许

你足够小心，能避免这种事情的发生，但我做不到。实际上，我有一次把所有的抽屉都掉在了地板上。

我个人喜欢使用 Darice 的小储物盒，如图 5-4 所示。你可以在 Michaels 的商店少量购买，也可以在网上成批购买，这样更经济。请搜索：

```
darice 小储物盒
```



图 5-4　Darice 小储物盒是储存电阻器、电容器、半导体等元件的理想工具。盒子可以平稳摆放，在架子上或大箱子中堆放储存。粘贴标记用热风枪加热以后很容易撕掉

这些蓝色的盒子分成五个隔间，尺寸和形状正好适合存放电阻器。黄色的盒子分成十个隔间，适合存放半导体。紫色的盒子没有分隔，红色的盒子有各种大小的隔间。所有盒子的库存编号都相同：2505-12。

分隔物是模塑到盒子中的，所以你不会遇到这种烦人的事情：可移动的隔层松动滑出，于是元件混在了一起。盒盖咬合牢固，所以即使盒子掉落，它可能也不会打开。盒盖上有金属铰链，边缘有脊，可以安全摆放。

在进行一番搜索后，我找到了便宜的塑料盒，有盖子，约长 13 英寸，宽 8 英寸，深 5 英寸。每个盒子内可以放置九个 Darice 部件盒。可以将大盒子进行分类，存放在架子上。

贴标签

无论你储存部件的方法如何，为它们贴标签都十分重要。任何喷墨打印机都能印出整洁的标签，如果使用可剥离（非永久性）标签，你以后还可以重新整理部件，这一点看起来很有必要。我使用颜色编码标签标记电阻器，这样可以将电阻器的色带与标签编码相比较，立即就能发现电阻器是否放错了位置。如图 5-5 所示。



图 5-5　为了检查电阻器是否放错了隔间，可以在每条标签上印刷颜色编码

更重要的是，你需要把第二根标签（没有粘性）放置在隔间内部，与元件放在一起。这个标签写明了生产商的部件编码和来源，这样再次订购就很容易了。我从 Mouser 的店里购买了很多部件，每次打开装部件的小塑料袋后，我就剪掉袋子上有标签的部分，把它放入部件盒，然后把部件压在标签上。这样就省去了后面的麻烦。

如果我**真的**特别有条理，我还会在计算机上建一个数据库，列出我购买的每件物品，包括日期、来源、元件类型、购买数量等。但是我还没有达到这个程度。

工作台物品摆放

有些物品非常重要，应当永久固定在工作台上。它们包括烙铁、带放大镜的辅助工具、台灯、面包板、电源插座、电源，等等。关于台灯，我喜欢使用装有 LED 灯泡的，原因已在实验 14 中说明。

为项目选用的电源类型取决于个人喜好。如果你对电子学很感兴趣，可以购买台式电源，它可以输出多种经过调节和校准的电压，电流平滑。小型壁插式交流适配器做不到这点，它的输出也可能根据负载的大小而变化。但是，如你所见，它能满足基本的实验要求，而且当你使用逻辑芯片时，无论如何都要在面包板上安装 5 V 电压调节器。总之，我认为可以选择一台好电源。

另一件可选择的工具是示波器。它会向你展示导线和元件内部的电压波动图形。将示波器的探头放在电路中的不同位置，就可以追踪电路中的故障。这个小物件很好，但是要花好几百美元，而我们的项目至今还没有将它列为必需。如果你计划认真探究音频电路，示波器的重要性就大大增加了，因为你需要看到所生成的波形。

为了省去购买示波器的钱，你可以买一台小仪器，插在计算机的 USB 端口上，用计算机显示器显示波形。我试着用过一台，对结果不甚满意。它能用，但是对于低频信号的显示不够准确可靠。也许我不太幸运，但是我决定不再尝试其他品牌的此种仪器了。

毋庸置疑，你的书桌或工作台表面会布满刀痕和焊料滴。我用一块 0.5 英寸厚、2 英尺见方的三合板保护主要工作区，用一把小老虎钳夹住板子边缘。以前我用导电泡沫盖住三合板，以降低我身上的静电损坏敏感元件的风险，但是过了许多年，我认识到，我使用的地毯、椅子和鞋子加在一起恰恰不会让我积累静电荷。这就需要你根据经验确定情况了。如果你发现触摸金属物体时会蹦出小火花，并且感到手上一阵电击，那就需要考虑将自身接地，可能还要在工作台上铺一块防静电泡沫（或金属片）。

你在工作时会不可避免地把工作台弄乱。小段的弯曲导线、游离的螺钉、紧固件、剥除的导线层等都容易堆积，成为累赘。如果金属碎片或碎屑进入你正在搭建的电路中，还可能引起短路。因此你需要用到垃圾箱，但是一定要方便使用。我用一个大垃圾桶装垃圾，因为个头很大，所以我向它扔的任何垃圾都不会掉出来，我也不会忘记它的存在。

最后一台设备是最重要的：计算机。由于所有的数据表都可以在网上获取，所有的元件也可以在网上订购，很多示例电路也由业余爱好者和教育者在线提供，所以我认为如果没有快速的网络连接，就无法高效工作。为了避免浪费空间，你可以将计算机机箱放在地上，把它的显示器安装在墙上；或使用平板电脑、小型笔记本电脑，它们占用的空间最小。

图 5-6 展示了钢制书桌上可能的工作台布局，图 5-7 展示了一种更节约空间的布局。

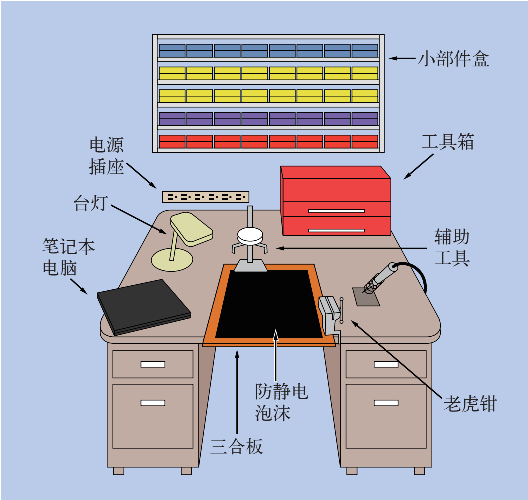


图 5-6　在搭建小型电子电路时，老的钢制办公桌即使不优于传统的工作台，也和后者一样好。它能提供较大的工作区和丰富的储藏空间，在处理对静电敏感的元件时，也足够让你良好接地



图 5-7　为了最大限度利用可用空间，可以考虑围起三面墙

在线参考资源

当有人请我推荐入门级基础知识网站时，我一般推荐 Doctronics（http://www.doctronics.co.uk）。

我喜欢该网站绘制电路图的方式，也喜欢他们用面包板讲解电路的方式，我自己就是这么做的。该网站还销售套装——如果你愿意花钱花时间，让东西从英国运来的话。

我喜欢的第二个网站也是英国的：Electronics Club（http://electronicsclub.info）。它不如 Doctronics 全面，但是内容友好易懂。

若想阅读更多理论资源，请访问 ElectronicsTutorials（http://www.electronics-tutorials.ws）。

此网站上的内容比我讲述的理论更深入一些。

若想了解各种奇异的电子学话题，请访问唐 • 兰开斯特维护的 Guru's Lair 网站（http://www.tinaja.com）。

兰开斯特在 30 多年前写了 *TTL Cookbook* 一书，它启蒙了至少两代电子爱好者和实验人。他很了解自己所写的内容，也敢于进入要求更高的领域，例如自己写附言打印机驱动程序，自己制作串行端口连接。在他的网站上，你会发现很多新想法。

参考书籍

你确实需要阅读书籍。图 5-8 展示了我常读的几本书。



图 5-8　唐 • 兰开斯特所著的 TTL 经典指南书籍虽然久经风吹日晒，但仍是我最常参考的书籍。它于 40 多年前开启了电子学爱好者的新纪元。书中的大部分信息仍然很有用，其副本也有二手来源，包括亚马逊

由于你已经在阅读本书，我就不推荐其他入门教材了。但是我要推荐其他几本教材，它们会带你深入各个领域，可以作为参考。

Make: More Electronics 是我为本书写的续篇，它包含了本书因篇幅限制而未详述的所有话题（例如运算放大器）。有些电路更加宏大。如果你阅读了本书及其续集，就能在适当的预算下接触到电子学的大部分领域。

撰写《电子元件百宝箱》的时候，我还不知道它的需求如此之大，因此三卷一再拖稿。在我写作本书时，第一卷和第二卷正在印刷，而当你读到本书时，第三卷可能也已出版。本丛书适合快速查阅，它们可以提醒你所遗漏的事项，并且有诸多详细讲解。相比之下，《身边的电子学》则完全是一本动手操作的指南，我试图不陷于细节之中。

现在我要列出别人所著的重要参考书籍。

保罗 • 舍茨（Paul Scherz）和西蒙 • 莫克（Simon Monk）合著的《实用电子元器件与电路基础》内容丰富全面，40 美元的标价非常值。忽略题目吧，没有实践的人也可以读这本书。从电阻器和电容器的基本特性一直到高端的数学理论，该书广泛覆盖了各种概念，是我的主要参考资料。

马西莫 • 班齐（Massimo Banzi）和米歇尔 • 夏依洛（Michael Shiloh）合著的《爱上 Arduino》：本书是最简单的入门书籍，能够帮助你熟悉 Arduino 的处理语言（如果你之前已经对 C 语言有所了解，那么我可以告诉你，这种语言和 C 语言相似）。

汤姆 • 艾戈（Tom Igoe）著的《创客圣经：33 个智能化应用项目》宏大而全面，展示了如何最大限度地利用 Arduino 的功能，与操作环境进行交流，甚至让它连网。

唐 • 兰开斯特著的 *TTL Cookbook* 的 1974 年版权日期不是错印！你也许能找到一些较新的版本，但是无论你购买哪一版，到手的书都年头久远。兰开斯特写作这本书的时候，CMOS 芯片（例如 74HC*xx* 系列）还没有对 74*xx* 系列芯片进行引脚至引脚的精确模仿。但它仍是一本很好的参考书，因为概念和部件编号从未改变，而且作者的描述非常精确简洁。你只需记住，书中关于高低逻辑电平的信息不再准确即可。

牛顿 • 布拉加（Newton C. Braga）著的 *CMOS Sourcebook* 专注于 4000 系列 CMOS 芯片的研究。

同本书中主要使用的 74HC*xx* 系列芯片不同，4000 系列芯片较老，必须小心使用，因为它比后续几代芯片更被静电损害。但是，这些芯片的应用仍然很广泛，它们最大的优势就是能在很大的电压范围下工作，一般为 5 V~15 V。这意味着你可以用 12 V 电路驱动 555 定时器，然后用定时器的输出直接输入 CMOS 芯片（举例）。此书分为三个部分：CMOS 基础知识、功能电路图（给出了所有主要芯片的引脚分配），以及说明如何使芯片实现基本功能的简单电路。

鲁道夫 • 格拉芙（Rudolf F. Graf）著的 *The Encyclopedia of Electronic Circuits* 包含了各种各样的电路图，解释语言最为精简。如果你有自己的想法，又想知道别人如何解决这个问题，本书对你会有很大的帮助。例子总要比一般性的解释更宝贵，而这本书包含了大量的示例。此丛书系列后来又出版了很多本，但是请从这一本开始看，你会发现其中有你所需要的任何知识。

蒂姆 • 威廉姆斯（Tim Williams）著的 *The Circuit Designer's Companion* 提供了大量关于实际应用的有用信息，但是讲解风格较为枯燥，侧重技术。如果你有兴趣把自己的电子项目付诸实际应用，此书可能比较有用。

保罗 • 霍洛维茨（Paul Horowitz）和温菲尔德 • 希尔（Winfield Hill）合著的《电子学》已经再版二十余次。这说明了两个事实。第一，很多人把此书作为基本资料，第二，二手书应该很容易买到，这一点值得考虑，因为这本书定价 100 多美元。这本书由两位学者合著成，比《实用电子元器件与电路基础》一书的方法更偏重技术，但是我在查找备份信息时，发现书中的内容非常有用。

福雷斯特 • 米姆斯三世（Forrest M. Mims III）著的 *Getting Started in Electronics* 第 1 版出版于 1983 年，但它现在仍然非常有趣。我认为本书已经覆盖了它包含的很多话题，但是从完全不同的资料中阅读讲解和建议，也会获益匪浅；而且此书在某些电学理论上更为深入，讲解明白易懂，插图也很好看。请注意，这本书内容比较简略，覆盖的方面有限。不要期望它能提供所有的答案。

实验 25：磁性

调查过了你未来的选择，我们来谈论一个一直隐藏在背后的重要话题：电与磁之间的关系。这个话题将带领我们快速了解音频复制和无线电的相关内容，我也将描述自感的基础知识，它是无源元件的第三种基本特性，也是最后一种（另外两种是电阻和电容）。我将自感放到最后讲解，因为它在直流电路中的应用有限。但是一旦处理波动的模拟信号，自感就变得尤为重要。

基础知识：双向关系

电能生磁。

当电流流过导线时，电流在导线周围产生磁场。

该原理几乎应用于全世界所有的电动机。

磁能生电。

当导线在磁场中运动时，磁场在导线中产生电流。

该原理应用于发电。柴油机、水动力涡轮机、风车或其他形式的能量源可以让线圈穿过强大的磁场，线圈中感应出电流。除太阳能电池以外，所有电源都使用磁铁和线圈产生电能。

在下一个实验中，你会见到磁生电效应的生动小型演示。任何学校的科学课都应当讲过此效应，但是即使你过去做过这个实验，我也建议你再做一遍，因为实验的设置只需几分钟。

需要的工具

- ❒ 大螺丝刀 1 把
- ❒ 22 线规导线，或更细（不长于 6 英尺）
- ❒ 9 V 电池 1 块
- ❒ 回形针 1 个

实验步骤

步骤非常简单。将导线缠绕在螺丝刀的轴上，靠近尖端。绕线要整齐紧密，一共绕 100 圈，总宽度不能超过 2 英寸。为使宽度满足要求，后面的导线要绕在已经缠绕好的导线上。如果最后一圈容易松动，就用胶带粘牢。

现在接通 9 V 电池，乍一看，这个主意似乎很不好，因为你要像实验 2 中所做的那样，短接电池。但是当你让电流通过绕成线圈的导线而非直导线时，电流的流动受到抑制（抑制方式我将很快解释），电流做功（例如，它可以移动回形针）。

将一个小回形针放在螺丝刀的尖端附近，如图 5-9 所示。

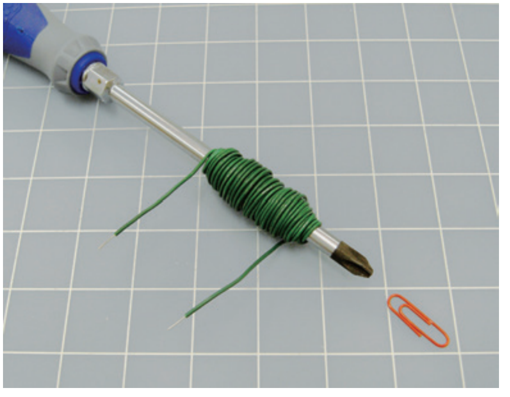


图 5-9　最简单的电磁铁恰好能吸引一枚回形针

桌面应当平滑，这样回形针就能轻易穿过桌面。因为很多螺丝刀本身具有磁性，所以你可能发现回形针自然地被螺丝刀尖所吸引。倘若如此，请把回形针移出螺丝刀吸引的范围。将电路接通 9 V 电压，回形针就会跳到螺丝刀尖上。

祝贺你，你刚刚做好了电磁铁。电路图如图 5-10 所示。

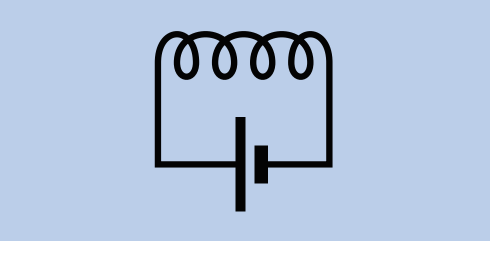


图 5-10　最简单的电磁铁电路图

理论知识：电感

当电流通过导线时，它在导线周围产生磁场。因为电流“感应”出了磁，所以称此效应为**电感**。图 5-11 解释了电感现象。

直导线周围的磁场很弱，但是如果把导线弯成圆圈，磁场就会积累，方向指向圆圈的中心，如图 5-12 所示。如果增加更多的圈数，绕成线圈，磁场就会更强。而如果在线圈中央插入钢铁制品（例如螺丝刀），磁场还会进一步增强。

图 5-13 用图表解释了这个原理，附上了惠勒近似公式，该公式允许你在已知线圈内圈半径、外圈半径、宽度和线圈匝数的情况下，近似计算线圈的电感（长度单位必须为英寸而非公制单位）。电感的基本单位为亨利，因美国电学先驱约瑟夫·亨利（Joseph Henry）而得名。因为这个单位很大（与法拉类似），所以公式中表示电感的单位为微亨。

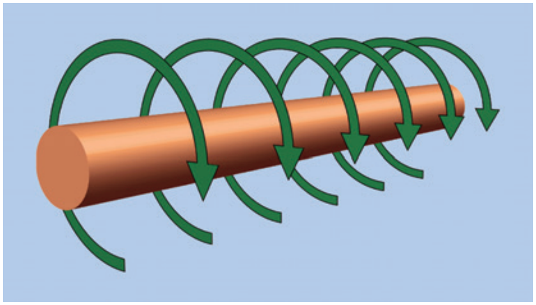


图 5-11　当电流从左至右流过导体时，导体感应出磁场，方向如图中绿色箭头所示

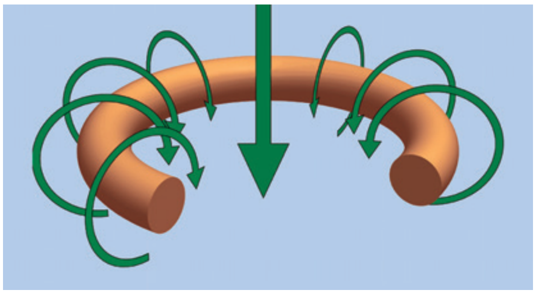


图 5-12　当导体弯成圆圈时，磁场就会积累，方向指向圆圈的中心，如图中的大箭头所示

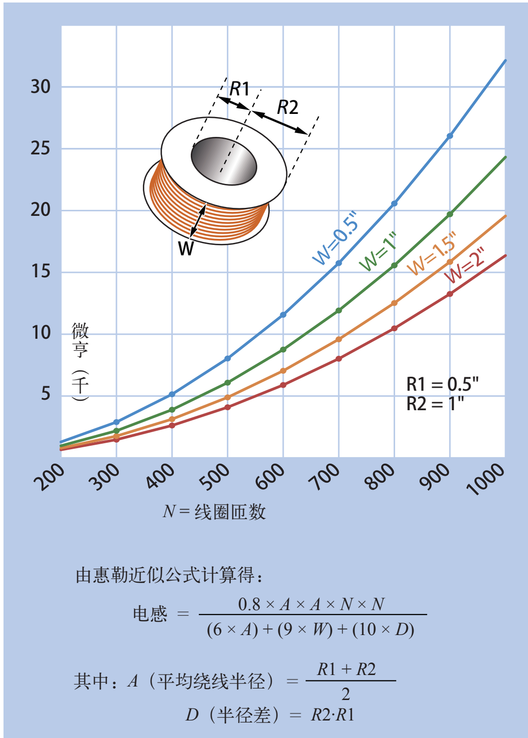


图 5-13　线圈的尺寸和圈数对电感的影响，使用简单的公式近似计算

从图表中可以看出，如果保持线圈的基本尺寸一致，将线圈匝数加倍（使用较细的导线或绝缘层较薄的导线），线圈的感抗会增加到原先的四倍。这是因为公式分子上包含了 $N \times N$ 因子。以下是一些重要的信息。

- ❒ 电感随线圈直径的增大而增大。
- ❒ 电感的增加与线圈匝数的增加大约成平方正比关系。（也就是说，线圈匝数扩大到原先的三倍，电感增大到 9 倍。）
- ❒ 如果线圈匝数一定，绕线间隔越大电感越小，绕线越紧密电感越大。

基础知识：线圈的电路图符号和相关知识

请参考图 5-14 中的线圈电路图符号。从左至右，前两个符号表示空心线圈（第一个符号更古老一些），第三个、第四个符号分别表示线圈绕在实心铁芯上，或由铁颗粒 / 铁素体构成的材料上。

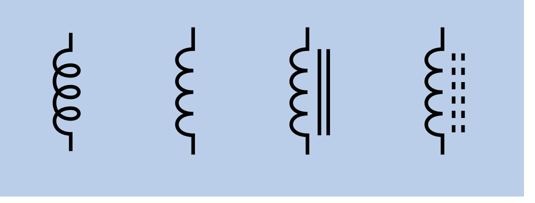


图 5-14　表示线圈的电路图符号

铁芯会增加线圈的电感，因为它会增加磁效应。

产生磁场的线圈一端连接电源正极，另一端连接接地负极。如果将电源正负极颠倒，磁场的方向也会颠倒。

线圈的最广泛应用应该是变压器，一个线圈中的交流电使另一个线圈感应出交流电，这两个线圈通常共用一个铁芯。如果原级（输入）线圈的圈数是次级（输出）线圈的一半，则输出电压会加倍，输出电流减半——假设变压器的效率是 100%。

背景知识：约瑟夫 · 亨利

约瑟夫 • 亨利出生于 1797 年，是开发和演示大功率电磁铁的第一人。他还首先提出了“自感”的概念，指线圈的“电惯量”特性。

亨利是纽约州奥尔巴尼市一位散工的儿子。他最初在杂货店工作，后来当了钟表匠的学徒，还梦想成为演员。朋友们说服亨利报考奥尔巴尼学院，他在学院显示出了自己的科学天赋。虽然亨利不是大学毕业生，还自称“主要靠自学”，但是 1826 年，他被任命为学院的数学和自然哲学教授。迈克尔 • 法拉第在英国从事相似的工作，但是亨利并不知情。

1832 年，亨利调到普林斯顿大学执教，年薪一千美元，学校还赠送一幢住宅。当莫尔斯试图申请电报的专利时，亨利证明自己已经知道了电报的创意。当他在哲学会堂的实验室里工作时，的确装备了一套原理相似的系统，用来给家里的妻子发送信息。

除了物理学，亨利还教授化学、天文学和建筑学。因为科学当时还没有像今天这样严格划分成各个专业，所以他研究了磷光现象、声、毛细管作用、弹道学，等等。1846 年，他成为了新成立的史密森尼学会（Smithsonian Institution）的会长。他的照片如图 5-15 所示。



图 5-15　约瑟夫 • 亨利，美国实验家，电磁现象研究的先驱。本照片存档于维基共享资源

实验 26：桌面上的发电系统

实验 5 中，你发现化学反应能够生电。现在，让我们学习一下如何用磁铁生电。

需要的工具

- ❒ 剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表
- ❒ 圆柱形钕磁铁 1 块，直径 3/16 英寸，长 1.5 英寸，轴向磁化
- ❒ 连接线，26 线规、24 线规或 22 线规，总长 200 英尺
- ❒ 低电流 LED 1 个
- ❒ 1000 μF 电容器 1 个
- ❒ 开关二极管，1N4001 或类似型号 1 个

以下为可选工具。

- ❒ 圆柱形钕磁铁 1 块，直径 3/4 英寸，长 1 英寸，轴向磁化
- ❒ 直径半英寸的木钉，最短 6 英寸
- ❒ 钢螺丝，6 号尺寸，平头
- ❒ PVC 水管，内径 3/4 英寸，最短 6 英寸
- ❒ 两片三合板，厚 1/4 英寸，长和宽均为 4 英寸（需要用 1 英寸的孔锯或平底钻头在三合板上钻孔）
- ❒ 线圈线，四分之一磅，26 线规，约长 350 英尺

步骤

首先需要一块磁铁。钕磁铁最容易买到，如果你选择小圆柱形磁铁，也比较便宜。一块直径 3/16 英寸、长 1.5 英寸的磁铁可以满足实验需求。将 22 线规的导线紧紧缠绕在磁铁上约 10 圈，如

图 5-16 所示。然后让导线略微放松，这样磁铁就可以在线圈中滑动了。

将万用表设置为测量交流毫伏电压（非直流，因为我们要处理的是交变脉冲电压）。将线圈两端的绝缘层剥除一小段，用弹簧夹测试引线连接到万用表上。用拇指和食指夹住磁铁，将它在线圈中来回迅速移动。我猜测你会在万用表上看到 3 mV~5 mV 的电压显示。是的，这块小磁铁和 10 圈导线能产生几毫伏的电压。

试着绕一个更大的线圈，盖住下层的导线，如图 5-17 所示。再次迅速移动磁铁，你会发现产生的电压更大。

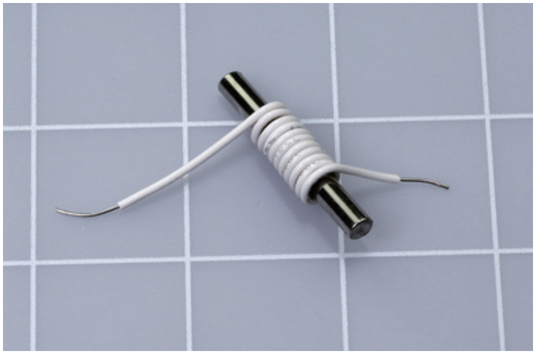


图 5-16　10 圈导线足以让磁铁在其中运动时产生小电势



图 5-17　增加线圈匝数会使磁铁移动时产生的电压更大

还记得上一个实验中的公式吗？我用它说明了电流通过匝数更多的线圈时如何感应出更强的磁场。电磁感应的作用是双向的。

当磁铁穿过线圈时，线圈匝数越多，产生的电压也越大。

这不禁让我思索——如果有更大、磁性更强的磁铁，线圈匝数也**很多**，能否产生足够的电能，用来给某些器件（例如 LED）供电呢？

点亮 LED

我要使用 22 线规的导线，因为你已经在其他实验中用到了它。问题是，这种导线比较粗，绝缘层也较厚，绕两百圈会变成一个大线团。这就是我们使用**线圈线**的原因，它由纯铜制成，表面绝缘层非常薄，用虫漆或塑料薄膜制成。线圈线用于非常紧密地绕线。

但是，你可能不想花钱购买一卷线圈线，因为它没有其他的用途。所以我决定看看 22 线规的连接线是否适用于本实验。答案是肯定的，但仅限于本实验。

你需要 200 英尺长的连接线。这是一笔花费，但是导线还有一般的用途，例如制作面包板的跨接线。

在绕线时，你可以将两段或更多的导线连接在一起，只需要将剥除绝缘层后的末端紧密连接，不需要焊接导线。

你还需要一块磁性更强的磁铁。我使用的最小圆柱形钕磁铁直径 3/4 英寸，长 1 英寸，轴向磁化，即磁铁的南北极在轴的两端。（轴是一根假想的线，穿过圆柱体中心，与圆柱体的弧形侧面平行。你可以将圆柱体想象为绕轴转动的杆状物体。）

图 5-18 展示了我做好的装置。磁铁在右侧，线轴由厚 1/4 英寸的三合板制成，直径只有 4 英寸多一点。一段长 3/4 英寸的 PVC 水管穿过线轴的中心，水管的内径只比磁铁的直径宽一点，这样磁铁就可以自由地在水管中滑动了。



图 5-18　自制的线轴上缠绕了 200 圈 22 线规的导线，磁铁用螺钉固定在木钉上

将钻好孔的三合板插在水管上，做成一个线轴。现在你需要把 200 英尺的导线绕在线轴上——注意要留出导线的里侧一端。我在一片三合板上接近中心的位置钻了一个小孔，引出导线。

绕成的线圈宽度应当与磁铁的长度接近，而水管内的磁铁也应能够从线圈的一端完全露出。图 5-19 中线轴的横截面图说明了我的意思。

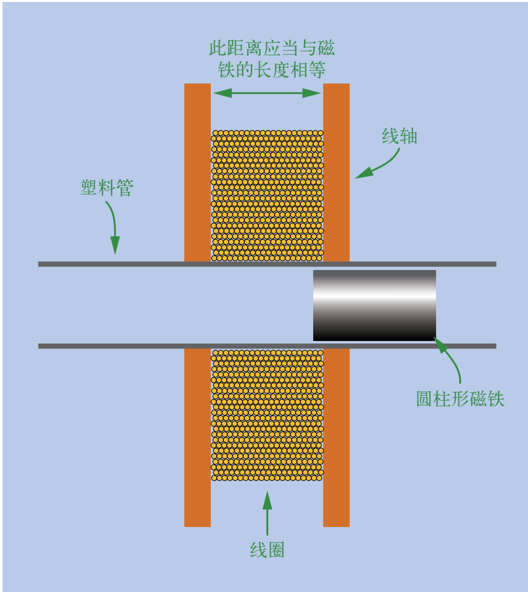


图 5-19　产生恰好能够点亮 LED 的电压的设置

为了方便地固定住磁铁，我在一段 1/2 英寸长的木钉一端钻了一个孔，装入一个 6 号平头螺钉，1 英寸长。这样我就能把木钉当作手柄，而磁铁则牢牢地吸在螺钉上。

现在重要的时刻来到了。用一对弹簧夹测试引线夹住线圈的两端，连接万用表的输入，将万用表再次设置为测量交流电压，但是量程为 2 V。

磁铁在木钉上安装好以后，就可以迅速推动它在 PVC 管中来回运动了。你也可以不用木钉，直接把磁铁扔进管子里，用拇指和食指堵住管子两端，上下摇晃。在你的努力下，万用表显示的电压应该约为 0.8 V。

费了那么大劲，才产生了不到 1 V 的电压？

这是因为万用表显示的是电压均值。每个脉冲的峰值电压都应该更高。

断开测试引线与万用表的连接，将它们连接到低电流 LED 上。夹住 LED，使它不会到处乱撞。现在，用力移动磁铁，就会看见 LED 闪烁。如果 LED 没有亮起，就颠倒塑料管中磁铁的方向，再次尝试。本实验确实需要低电流 LED 才能成功。

可选扩展实验

如果你愿意多花一点钱，就能得到更加令人印象深刻的实验结果。

首先，使用一块更大的磁铁。我利用长 2 英寸，直径 5/8 英寸的磁铁得到了非常好的结果。当然，你需要用直径更大的 PVC 管容纳这块磁铁。

其次，购买一卷合适的线圈线。我使用长 500 英尺的 26 线规线圈线。在线购买很容易，供应商有数十家。

如果你足够幸运，买来的线圈线会绕在塑料线轴上，中间有一个直径比磁铁略大的孔。更棒的是，你还能在线轴中心找到探出来的线圈“尾巴”，如图 5-20 中的红圈所示。

为了去掉线圈线两端的薄绝缘层，可以用刀刃轻轻刮除，也可以用细砂纸擦除。用放大镜检查并确定绝缘层已经去除。你也可以用万用表检测阻值，线圈的阻值应当小于 100 Ω。

现在，你可以将 LED 连接到线圈的两端，推动磁铁来回穿过线轴中心，产生电压，如图 5-21 所示。



图 5-20　一卷线圈线，可以找到线的内端（红圈标记处）

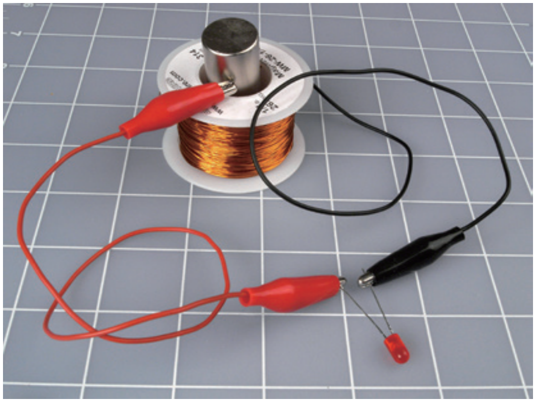


图 5-21　准备好产生电能，设备规模较小

如果线轴的尺寸不合适，或者导线的末端找不到，你就要将导线重新绕到另一个线轴上。假设线长 500 英尺，就需要重新绕上 2000 余圈。如果你每秒能绕四圈，就需要 500 秒钟——比 10 分钟略短，我认为这是可以接受的。

图 5-22 展示了我为演示而制的较大设备。线圈用环氧树脂胶粘牢，不会松动，我将管子安装在一块塑料上，牢牢固定。我的钕磁铁连接到一根铝棒末端的钢螺丝钉上，如照片所示。

我在线圈上增加了两个高亮度 LED，引脚连接方向相反。当磁铁上下运动时，LED 点亮了整个房间。而且，相反的连接方向表明，在磁铁向上运动时，线圈中的电压朝一个方向，而在磁铁向下运动时，线圈中的电压朝另一个方向。如图 5-23 所示。

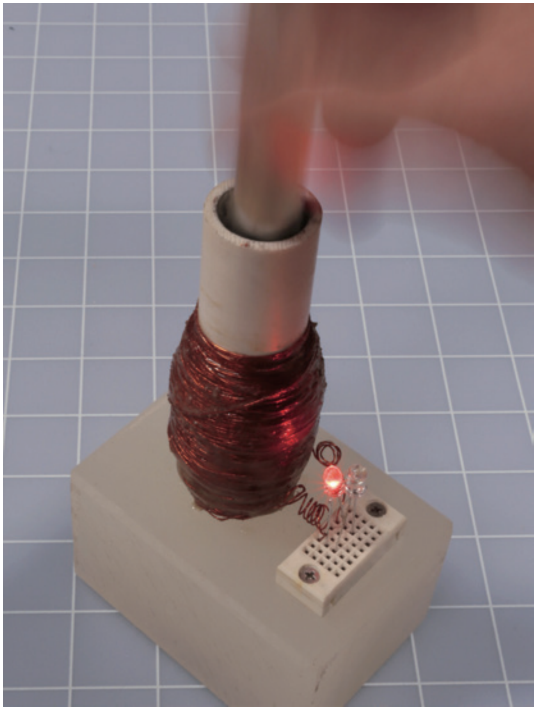


图 5-22　能够产生炫目效果的演示设备

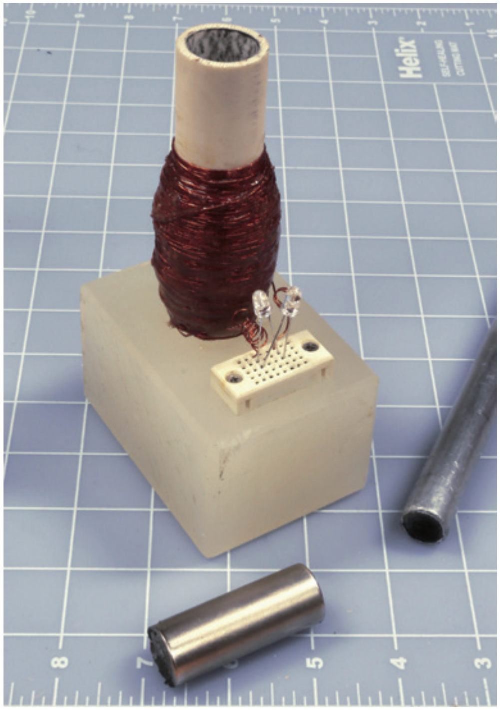


图 5-23　使用了 LED 的发电装置正在运转

注意：伤亡事故

请注意，钕磁铁非常易碎。

钕磁铁很易碎，与另一块磁性金属（或磁铁）碰撞，容易碎裂。因此，很多生产商都建议使用者佩戴护目用具。

使用磁铁时，很容易挤到手指，**挤出血泡**（甚至更惨）。因为磁铁的吸引力会随着它和物体之间距离的缩短而增大，所以最后的缝隙瞬间闭合时，力度会非常大，很容易夹到手！

磁铁永不休眠。在电子的世界中，我们常常觉得某个器件关闭电源后，就不再危险了。但是磁铁的情况不同，它们总是在感知周围的世界，一旦发现铁磁性的物体，就会**立即**产生吸力。结果可能令人非常不愉快，如果物体有尖锐的边缘，你的手又恰好挡在中间，你就尤其容易受伤。使用磁铁时，请在非磁性的表面上清理出一片区域，并注意表面下方的磁性物体。例如，我的磁铁感觉到厨房工作台面下方安装有一根钢螺丝钉，于是狠狠砸在了工作台面上，我可不想让它这样。

除非事情发生在你身上，否则很难引起你的注意。但是，钕磁铁真的很危险，你一定要谨慎行事。

而且，请记住**磁铁会创造磁铁**。当磁场穿过铁制或钢制物体时，该物体自己会产生磁性。如果你佩戴手表，一定要小心不要磁化它。如果使用智能手机，也要让它远离磁铁。同样，电脑或磁盘驱动器也容易受到损害，信用卡上的磁条很容易被抹去。还要注意让磁铁远离电视机屏幕和视频监控器（尤其是阴极射线管）。最后还要一件重要的事，磁性很强的磁铁可以干扰心脏起搏器的正常运行。

给电容器充电

下面是另一项实验。断开 LED 与线圈的连接，串联连入 1000 μF 的电容器和 1N4001 信号二极管，如图 5-24 所示。连接万用表，测量电容器两端的直流电压（这次不是交流了）。

如果你的万用表可以手工调节量程，请将它调至至少 2 V 直流。确定二极管的正极（未标记）一侧连接到电容器的负极（标记）一侧，这样电压就会通过电容器，再流过二极管。

现在让磁铁在线圈中剧烈地上下移动。万用表应当显示出电容器正在积累电荷。停止移动磁铁后，电压读数会非常缓慢地下降，这主要是因为电容器通过万用表的内阻缓慢放电。

本实验的重要性不仅体现在现象上。请记住，当你将磁铁推进线圈时，线圈感应出一个方向的电流，而当磁铁被拉出线圈时，线圈又感应出相反方向的电流。你实际上正在产生交流电。

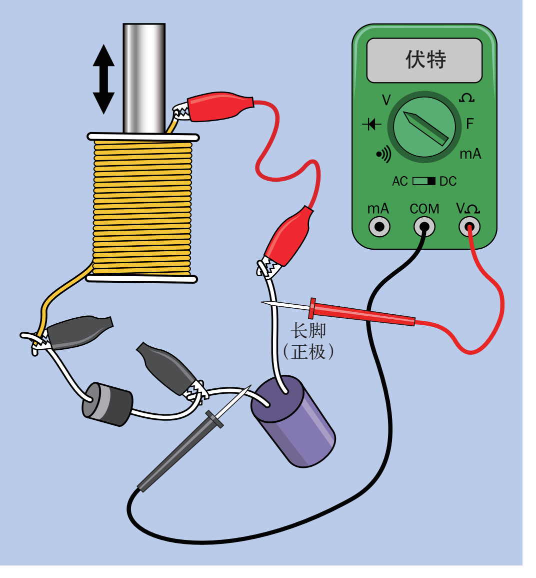


图 5-24　二极管允许你将线圈产生的电压积累到电容器中

二极管只允许电流沿一个方向流动。它阻碍反方向的电流，这就是电容器逐渐积累电荷的方式。你可以据此得出一个正确的结论：二极管能够将交流转换成直流。我们说二极管对交流电进行了“整流”。

下一步：音频

实验 25 展示了电能生磁，实验 26 展示了磁能生电。现在我们已经准备好把这些概念应用于音频的检测和再现。

实验 27：扬声器拆解

你知道，流过线圈的电流可以产生足够的磁力，使小型金属物体向线圈运动。如果线圈非常轻，而物体较重，会发生什么呢？这种情况下，线圈就会向物体运动。此原理是扬声器的关键。

要理解扬声器的工作原理，最好的方法就是拆开它。可能你并不喜欢花上几美元从事这项有破坏性却很有教育意义的工作，那么你可以在旧货卖场买一件不能运行的音频设备，从中拆取扬声器；或者只是看一看我的分步骤解释照片也可以。

需要的工具

- ❒ 最便宜的扬声器 1 个，最小直径 2 英寸
- ❒ 美工刀 1 把

步骤

图 5-25 展示了近距离观察的小扩音器。磁铁隐藏在密封的圆柱形部分内。

将扬声器翻过来，如图 5-26 所示。用尖锐的美工刀或刻刀沿着圆锥纸盆的外周切割一圈，然后沿着中央的圆圈切割一圈，取下割出的 O 形黑色纸片。



图 5-25　小扬声器的背面



图 5-26　待拆解的 2 英寸小扬声器

拆去圆锥纸盆的扬声器如图 5-27 所示。中心的黄色织物是柔韧性部分，通常允许圆锥内外振动，并防止其左右偏移。

沿着黄色织物的外周切割，可以取下一块隐藏的圆锥形纸片，它周围绕有铜质线圈，如图 5-28 所示。照片中，我将纸片翻转过来，易于观察。

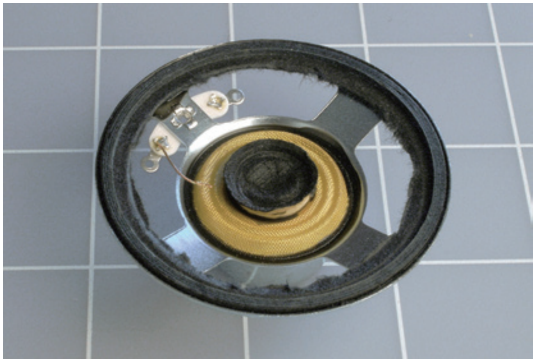


图 5-27　拆下圆锥纸盆的扬声器



图 5-28　铜质线圈通常隐藏在磁铁的凹槽内

铜质线圈的两端通过有弹性的导线从扬声器背面的两极获取电能。当线圈安装在磁铁的凹槽内时，线圈感知到电压的波动，在磁场的作用下产生向上向下的力。这种力使扬声器的圆锥纸盆振动，产生声波。

立体音响系统中大扬声器的工作原理完全相同。它们的磁铁和线圈更大，能够承受较大的功率（一般可达到 100 W）。

无论何时拆解这样的小元件，我都会为它的部件之细致和精密所折服，也惊叹于它可以以如此低的成本大批量生产。我想，如果法拉第、亨利和其他电学先驱看到这些元件被我们习以为常地使用，他们一定会非常惊讶。亨利曾经花上几天时间手工绕制线圈，他制作的电磁铁比这个便宜的小扬声器效率还要低很多。

背景知识：扬声器的起源

我在本实验开始时提到，如果线圈的磁场与较重的物体或固定的物体相互作用，线圈就会移动。如果该物体为永久磁体，则线圈与它的相互作用就会更加强烈，运动更加剧烈。这就是扬声器的工作原理。

1874 年，富于创造力的德国发明家厄内斯 • 西门子（Ernst Siemens）提出了这个概念。（他也于 1880 年建造了世界上第一部电梯。）今天，西门子 AG 是世界上最大的电子公司之一。

1876年，当亚历山大·贝尔（Alexander Graham Bell）为电话申请专利时，他采用了西门子的理念，在听筒中产生音频。从那时起，音频复制设备的质量和功率逐渐提高，直到1925年，通用电气公司的切斯特·莱斯（Chester Rice）和爱德华·凯洛格（Edward Kellogg）发表了一篇论文，建立了扬声器设计的基本原则，如今这些原则依然适用。

在 Radiola Guy（http://bit.ly/radiolaguy）这样的网站上，你会见到非常美丽的早期扬声器照片，它们采用号角式设计，使扩音效率最大化，如图 5-29 所示。随着音频放大器功率的增大，扬声器的效率与保真度和低生产成本相比，不再那么重要了。今天的扬声器仅将1%左右的电能转换为声能量。



图 5-29　图中漂亮的 Amplion AR-114x 型喇叭展示了早期设计者为使效率最大化付出的努力，当时音频放大器的功率非常有限。摄影 Sonny, the RadiolaGuy。http://www.radiolaguy.com 网站上有很多早期的扬声器图片，有些在售

理论知识：声音-电-声音

现在，关于声音如何转化为电，再转化回声音，我们应该建立更加明确的概念了。

假设有人用一根棍子敲锣，如图 5-30 所示。锣的平整金属表面来回振动，在空气中产生压力波，人耳接收压力波，听到声音。压力较高的波峰之后跟随压力较低的波谷，而声波的波长是两个相邻波峰之间的距离（通常范围为数米至数毫米）。

声音的频率是每秒钟波形的个数，通常用赫兹表示。

假设我们将一片很灵敏的塑料薄膜放在压力波经过的途中，塑料薄膜就会随着波而飘动，就像一片在风中飘动的叶子。假如非常细的导线绕成的线圈连接到薄膜的背面，它就会随着薄膜运动。我们再向线圈内部安装一块固定磁铁，这个配置就非常类似于小型超灵敏扩音器，只是该装置不是用电流产生声音，而是用声音产生电流。压力波使薄膜沿着磁铁的轴振动，磁场在导线中产生波动的电压。这一原理在图 5-31 中说明。

这个装置叫作**动圈式**话筒。话筒也有其他的构造方式，但是这种方式最明白易懂。当然，它产生的电压非常小，但是我们可以通过单个晶体管或一系列晶体管放大信号，如图 5-32 所示。

然后，我们可以将输出通过扬声器颈部的线圈，扬声器在空气中再造出压力波，如图 5-33 所示。

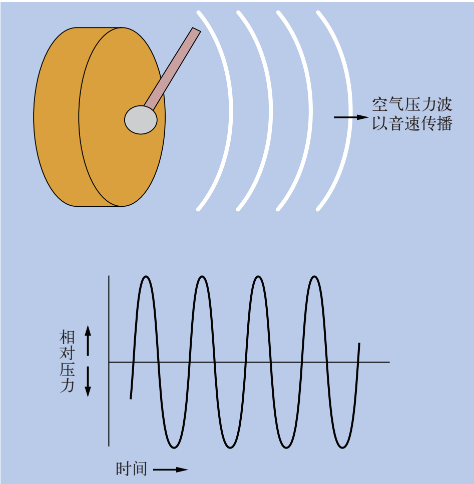


图 5-30　敲锣会让锣的平整表面振动，振动在空气中产生压力波

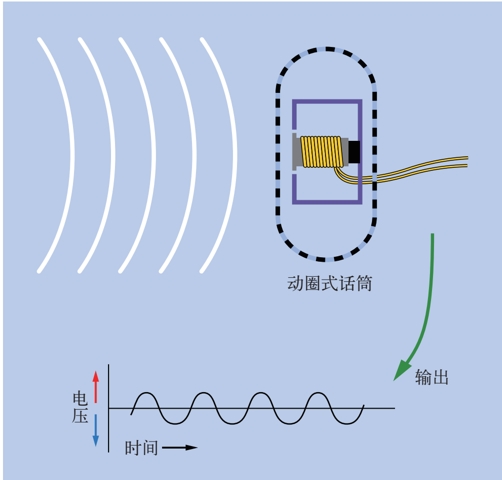


图 5-31　到达动圈式话筒的声波会使薄膜振动；薄膜连接到套在磁铁周围套管上的线圈上；线圈的运动会感应出小电流

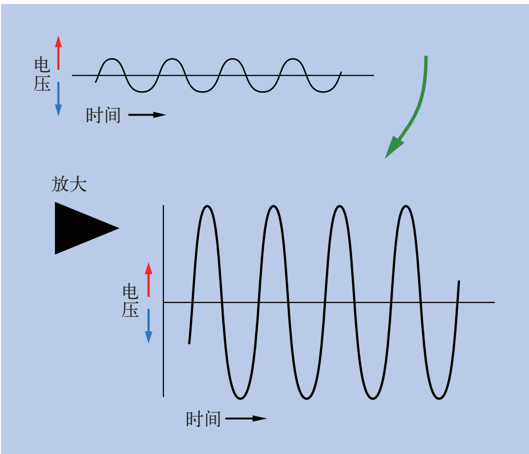


图 5-32　话筒发出的小信号通过放大器，放大器放大信号的幅度，保持频率和波形形状不变

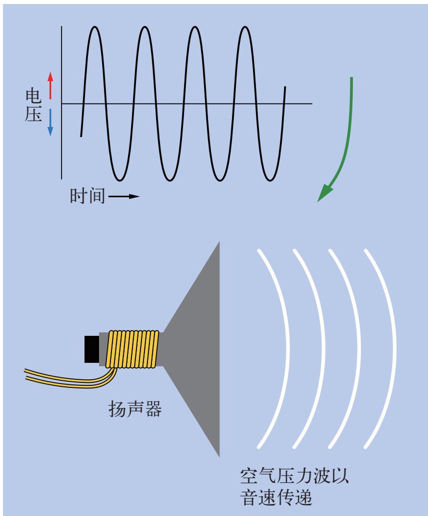


图 5-33　放大的电信号通过扬声器圆锥纸盆颈部的线圈；电流感应出的磁场使纸盆振动，再造出原始的声音

有些情况下，我们可能想录下声音，然后重新播放，其中的原理都是相同的。最困难的部分是设计话筒、放大器和扬声器，使它们在每个步骤都能**准确**地再现出声音。这是一项重大挑战，这也正是声音难以准确再现的原因。

实验 28：让线圈起来反抗

你已经知道，当电流通过线圈时，电流会产生磁场。那么切断电流后，它产生的磁场又会怎样？磁场中的能量转换回短暂的电流脉冲。我们说，此现象在磁场**衰减**时发生。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、万用表
- ❒ 低电流 LED 2 个
- ❒ 22 线规连接线（最好为 26 线规），长 100 英尺（1 卷）
- ❒ 47 Ω 电阻器 1 个
- ❒ 1000 μF 或容值更大的电容器 1 个
- ❒ 触摸开关 1 个

步骤

请观察图 5-34 所示的电路图。图 5-35 展示了面包板布局。线圈可以用一卷长 100 英尺的 22 线规连接线绕制成。或者，如果你在实验 26 中做好了 200 英尺的线圈，也可以用它实验；而如果你用的是线圈线，那就更好了。

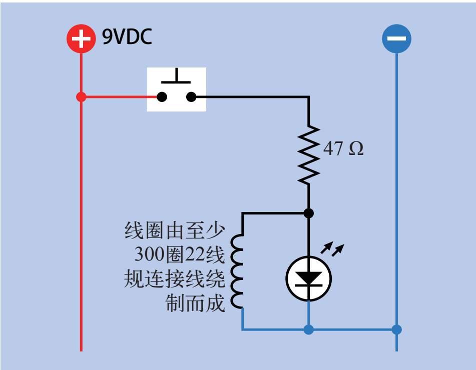


图 5-34　演示线圈自感现象的简单电路

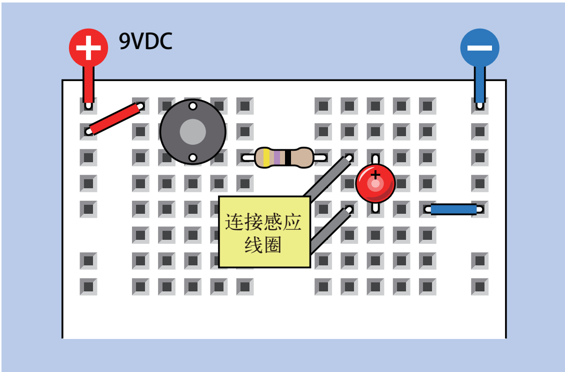


图 5-35　自感实验电路的面包板布局

电路图看起来似乎没有什么意义。47 Ω 的电阻器太小了，不够保护 LED。但是，当电流可以通过 LED 周围的线圈时，LED 为何还会亮起呢？

现在测试电路，你一定会很惊奇。每次按下按钮时，LED 都会短暂亮起。你能想象到其中的原因吗？

尝试在原来的 LED 两端再并联一个 LED，如图 5-36 和图 5-37 所示。再次按下按钮，第一个 LED 点亮，和之前一样。但是松开按钮，第二个 LED 也会点亮。

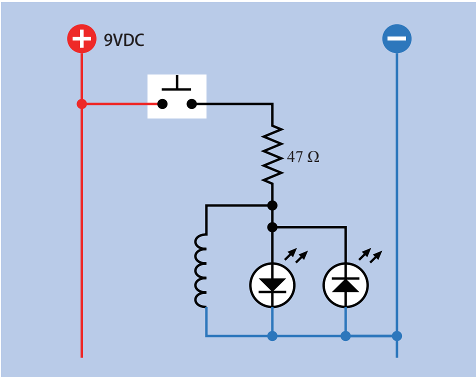


图 5-36　当磁场产生时，一个 LED 点亮；当磁场衰减时，另一个 LED 点亮

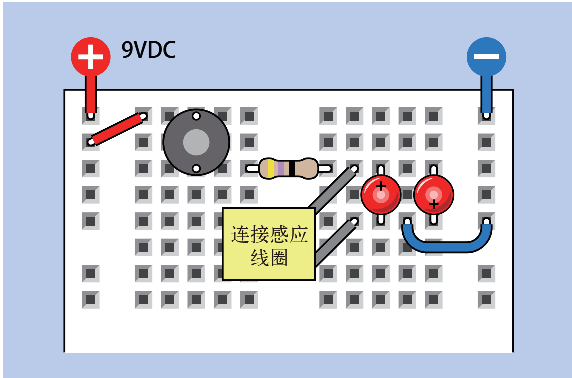


图 5-37　连入两个 LED 的演示电路面包板布局

衰减的磁场

下面是实验中发生的事情。首先，线圈需要一段短暂的时间，建立起磁场，在这段时间内，线圈阻碍了一部分电流。因此，一部分电流绕道流过第一个 LED。磁场建立好之后，电流就正常流过线圈了。

线圈的响应称为**自感**。有时人们使用术语**感抗**或电抗，但自感是最正确的名称，我将使用它。

切断电源以后，磁场衰减，磁场中的能量转化为短暂的电脉冲，因此，你松开按钮时，第二个 LED 点亮。

一般而言，不同尺寸的线圈存储和释放的能量大小不同。

也许你还记得，在实验 15 中，我建议你将二极管连接到继电器线圈两端，以吸收线圈通电和断电时产生的浪涌电流。现在，你已经目睹了这一现象。

电阻器、电容器和线圈

电子学最主要的三种无源元件是电阻器、电容器和线圈。现在，我们可以列举并比较它们的特性了。

电阻器限制电流，降低电压。

电容器允许初始电流脉冲通过，但阻碍直流。

线圈（通常叫做电感器）起初阻碍直流，但允许持续的直流通过。

我刚才展示的电路中没有用到高阻值的电阻器，因为我知道线圈只允许非常短暂的脉冲通过。如果我使用更常用的 330 Ω 或 470 Ω 的电阻器，LED 的闪烁就不那么容易可见了。

在未连接线圈的情况下，不要试图运行电路，因为你很快就会烧毁其中一个 LED，或两个都烧毁。线圈看起来没有什么作用，但它确实作用重大。

本实验还有最后一个电路，用来测试你对电子学基础知识的记忆和理解。按照图 5-38 和图 5-39 搭建一个新电路，使用 1000 μF 的电容器而非线圈（注意电容器的极性，正极引脚在顶端）。而且要使用 470 Ω 的电阻器，因为线圈不再能够阻碍和转移电流了。

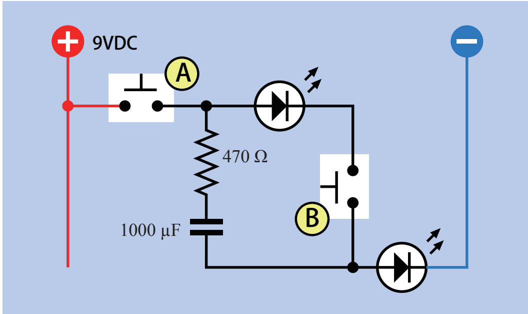


图 5-38　在很多方面，电容器的特性与电感器的特性相反

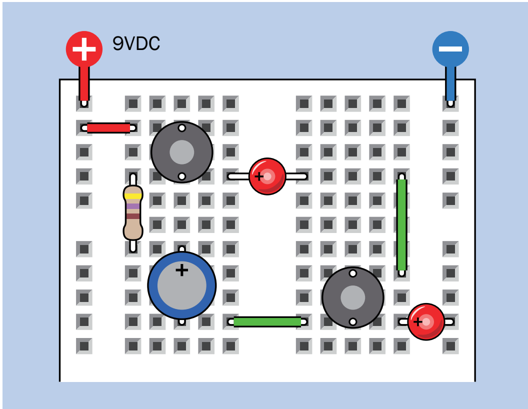


图 5-39　修改为电容器后的面包板布局

首先按下按钮 B 一两秒钟，确保电容器完全放电。现在，按下按钮 A，你会看到什么？也许你能猜到。请记住，电容器会通过初始的电流脉冲。底部的 LED 因此点亮，然后逐渐熄灭，因为电容器的上极板积累正电荷，下极板积累负电荷。随着这一切发生，底部的 LED 两端的电势差下降为零。

现在电容器充电完成，按下右侧的按钮，电容器通过顶端的 LED 放电。你可以将其视为图 5-37 中实验的等效电路，但是使用的是电容器而非电感器。

电容器和电感器都可以储存能量。使用电容器时，这个结论比较明显，因为高容值的电容器比高电感的线圈体积要小得多。

理论知识：交变电流的概念

下面是一个简单的假想实验。假设你搭建了一个 555 定时器，让它发送一连串脉冲通过线圈，这就是原始形式的交变电流。

线圈的自感是否会干扰脉冲序列呢？这取决于每个脉冲的时长，以及线圈的电感大小。如果脉冲的频率适当，线圈的自感持续时间就恰好能够阻碍每个脉冲。然后，线圈会及时恢复，阻碍下一个脉冲。连接电阻器（或扬声器自身的阻值）后，线圈能够抑制某些频率的信号，同时允许其他频率的信号通过。

如果你有这样一套立体音响系统，使用小扬声器输出高频声音，用大扬声器输出低频声音，那么扬声器音箱里面一定有一个线圈，阻止高频信号进入大扬声器。

如果把线圈换成电容器，会发生什么呢？如果对于电容器的容值而言，交流脉冲的长度较长，那么电容器就会阻碍脉冲。但是如果脉冲长度较短，电容器就能跟随脉冲有节奏地充放电，让脉冲通过。

本书篇幅有限，不能深入探究交变电流。这是一片广阔而复杂的领域，电流的特性奇异而精彩，描述电流的数学公式也十分繁杂，包括微分方程和虚数。（什么是虚数？最明显的例子是−1 的平方根。它怎么能存在呢？它确实不存在，这就是我们称之为虚数的原因。但是，它就这样出现在了电子学理论中。如果你觉得它很有趣，可以查找相关资料。）

但是线圈的实验还没有结束。下一个实验将演示上文所描述的音频效应。

实验 29：滤掉某些频率分量

本实验中，你要改变声音的频率。利用电感器和电容器，你可以滤除音频频谱的某些部分，产生各种各样的效果。

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表
- ❒ 9 V 直流电源（电池或交流适配器）
- ❒ 扬声器 1 个，阻抗 8 Ω，直径至少 4 英寸
- ❒ LM386 音频放大器芯片 1 枚
- ❒ 22 线规连接线，100 英尺
- ❒ 小型塑料储存箱 1 个，用作扬声器外壳
- ❒ 555 定时器 1 个
- ❒ 10 kΩ 电阻器 2 个
- ❒ 电容器：0.01 μF 3 个、2.2 μF 1 个、100 μF 1 个、220 μF 3 个
- ❒ 微调电位器：10 kΩ 1 个、1 MΩ 1 个
- ❒ 单极双掷滑动开关 4 个
- ❒ 触摸开关 1 个

给扬声器安家

我为前面几个实验推荐使用的小扬声器可以轻松地发出蜂鸣声，但在低音发声上能力很有限。因为我希望你听到电子元件对低音音符的影响，所以现在应该考虑更换较大的扬声器了，如图 5-40 所示，它的圆锥纸盆直径约为 4 英寸。

我先前讲过，扬声器背面产生的异相位声波需要抑制，所以要用盒子盛放扬声器。盒子也会通过共振放大声音，类似吉他音箱与弦的振动产生共鸣。

如果你有时间用三合板做一个盒子，那将非常理想，但是最简单、最便宜的盒子应该是带摁扣盖的塑料储存箱。图 5-41 展示了用螺栓把扬声器固定到塑料箱底部。在薄塑料上钻出整齐的孔比较困难，虽然我没有费太大力气。

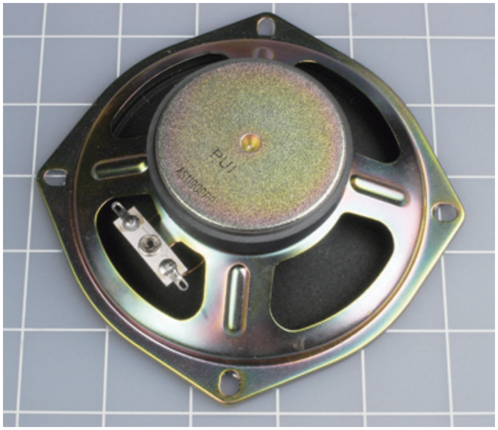


图 5-40　适合本实验的扬声器



图 5-41　如果你想听到扬声器发出较低频率的声音（低音），就很有必要使用共振外壳。便宜的塑料储存箱足以满足演示目的

为了提升塑料箱的性能，你可以在盖上盖子之前，在箱子内铺上一些柔软且厚实的织物。毛巾或袜子都可以吸收一些振动。

单芯片

20 世纪 50 年代，你需要用真空管、变压器以及其他大功率、大重量的元件搭建音频放大器。今天，你可以花 1 美元买到音频放大器芯片，再连接几个电容器和音量调节器，就可以使用了。

最简单、最便宜、使用最方便的一种芯片是 LM386，很多生产商都生产这种芯片，它们在编码前后额外添加了一些标识字母和数字。对于我们的实验目的而言，LM386N-1、LM386N 和

LM386M-1 功能基本一致。你只需确保自己购买的是通孔类型而非表面安装类型。图 5-42 展示了放大器的引脚分配。

这个小芯片的工作电压为 4 V~12 V 直流。虽然它的额定功率只有 1.25 W，但是你会惊异于它的音量之大。它的标称放大增益为 20∶1。

测试 1–2–3

为了进行测试，我要使用广泛覆盖音频频谱的频率源。有一种简单的实现方式用到了 555 定时器。在图 5-43 中的电路图中，定时器位于顶端，元件取值经过了安排，因此调节 1 MΩ 的微调电位器，电路可以输出范围约 70 Hz~5000 Hz 的信号。遗憾的是，你听到的响应不是线性的，微调电位器的转动对于高频信号的听觉影响比低频信号大得多。但是这对于演示目的而言已经足够，而且较低的频率也可以十分生动地演示音频滤波。

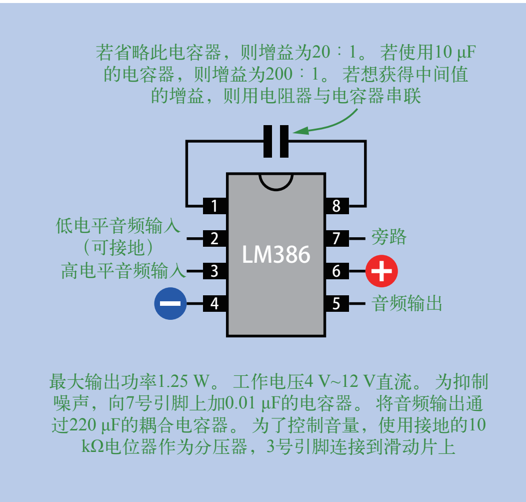


图 5-42　LM386 单芯片放大器的引脚分配

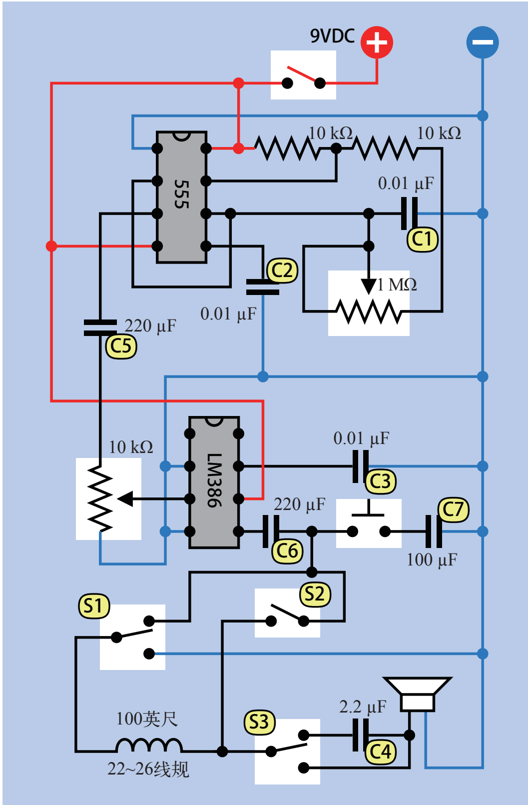


图 5-43　基本的音频实验电路

电路的面包板布局如图 5-44 所示，元件取值如图 5-45 所示。

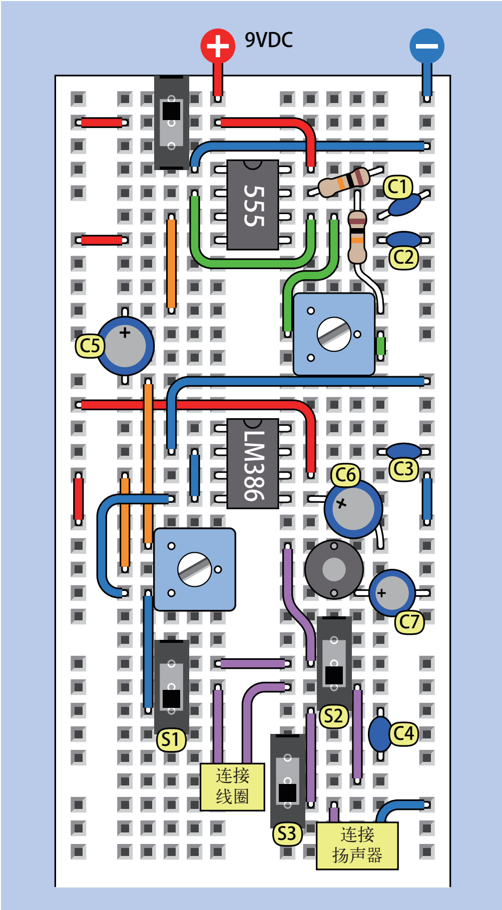


图 5-44　音频实验电路的面包板布局

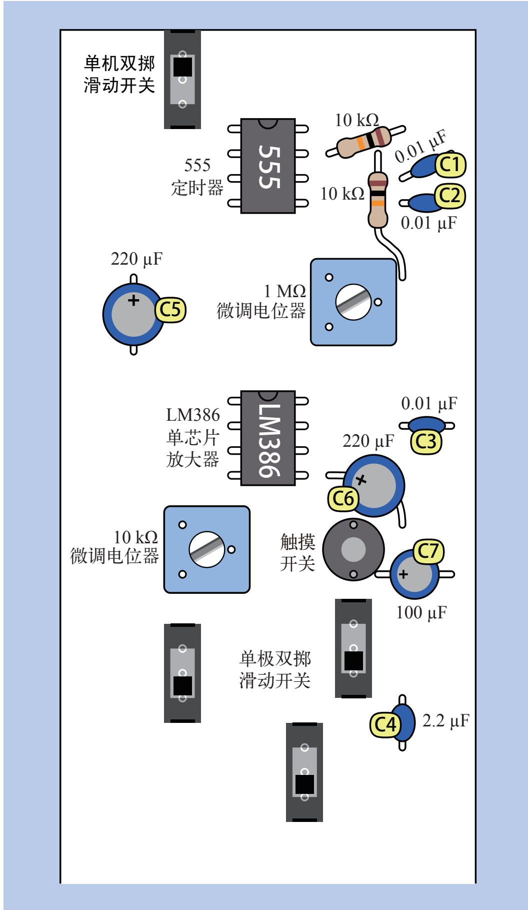


图 5-45　音频实验电路的元件取值

搭建此电路时，我需要提醒你：放大器对所有的电压波动都很敏感，而并非只对你想听到的音频变化敏感。任何电干扰都会被再现为混乱的抓挠和嗡嗡声，而如果你使用了多余的长导线连接各元件，问题可能会更严重。

放大器电路中最不需要的是一端带小插头的跨接线，因为它们的作用类似于收音机天线。我尝试限制图 5-44 面包板电路中所有导线的长度，并鼓励你也这样做。导线长度唯一影响不大的位置是芯片的电源-输出一侧，你需要将导线连接到扬声器和线圈上。

对于线圈，最理想的绕线是 22 线规或更细的线圈线，但是用一卷 100 英尺长的 22 线规连接线也可以听得到结果，而我在上一个实验中建议使用的 200 英尺长的连接线更佳。

现在，在为面包板供电之前，请注意电路底部附近的三个滑动开关，确保它们的滑动片都位于下方。而且要将两个微调电位器调到半量程的位置上。

电路的电源可以是交流适配器，也可以是 9 V 电池，没有特别规定。但是，如果你使用适配器，它可能会向电路中引入一些嗡嗡声。你可以在面包板的两根总线之间连接一个 1000 μF 或更大的电容器来消除杂音。如果你使用电池供电，放大器的功耗会使电池寿命降低到两三个小时，而一些滤音器会略微下拉电压，从而影响 555 定时器产生的声音频率。

一接通电源，你就应该能听到声音。如果听不到，首先采取的检修策略应为断开 220 μF 电容器的上端引脚与 555 定时器输出引脚的连接，然后用扬声器的导线短暂触碰电容器该引脚与负极总线。如果听不到声音，那么就是定时器周围的接线有错误。如果听到了声音，那么错误就与 LM386 放大器芯片有关。

要确保电源连接到 LM386 的正确引脚上。它的正负电源引脚位置与逻辑芯片不同。

仍然没有声音？断开与 10 kΩ 微调电位器连接的垂直蓝色短导线的上端。用手指触碰这段导线的末端，可以听到哨声和嗡嗡声，因为这根导线连接到放大器的输入引脚（4 号引脚）。还是没有声音？试着把扬声器连接到电容器 C6 的负极和负极总线之间。C6 为耦合电容器，直接连接到 LM386 的输出引脚。

如果以上试验均不成功，你将不得不用万用表检查电路各点的电压。

声音大冒险

假设你的电路现在可以正常运行，我先解释元件的功能，然后给出实验建议。我的讲解将参考图 5-44 面包板布局中的元件标签。

电容器 C1 与 1 MΩ 电位器共同设置定时器的频率。如果你想听到音调高于 5 kHz 的声音，可以将该电容器换成 0.0068 μF（6.8 nF）的电容器。

C5 是耦合电容器。它的容值很大，可以通过的信号频率范围很宽。它要阻碍 555 定时器输出的直流，因为你只希望放大波动的信号，而不希望放大基础电压。

C6 是另一个耦合电容器，保护扬声器不受放大器输出的直流电压损害。

电容器 C7 在你按下它旁边的按钮时，将放大器的输出耦合到接地负极。C7 的容值较高，能够滤除高频信号，将它们分流到地。去除了高频信号后，扬声器输出的声音听起来更加柔和。

电容器 C4 通过开关 S3 连入电路或从电路中断开。当开关的滑片位于上方时，555 定时器发出的声音通过 C4 进入放大器。因为 C4 的容值很小，所以它阻碍低频信号，输出细小微弱的声音。

电路最复杂的部分与线圈有关。我希望你听到线圈与扬声器并联和串联两种方式的差异。开关 S1 和 S2 提供了这两种连接方式，如图 5-46 和图 5-47 所示。线圈与扬声器并联称为使扬声器旁路。

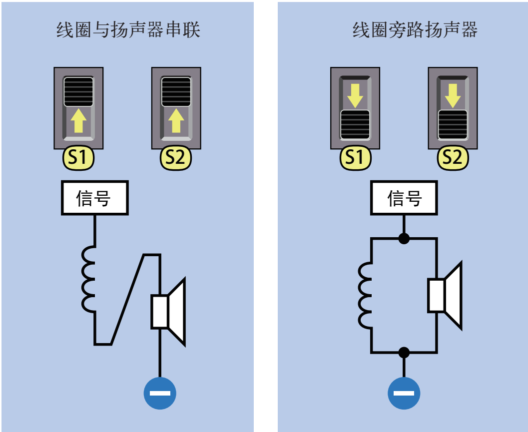


图 5-46　开关 S1 和 S2（电路面包板布局有标识）允许你向与外部线圈并联或串联的扬声器输入音频

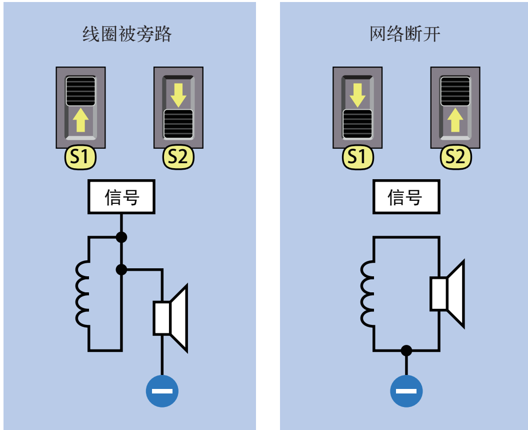


图 5-47　开关 S1 和 S2 的另外两种配置，允许旁路线圈，或者不让放大器输出声音

此处可以进行很多实验，考虑到在测试各种滤波器时可以调节声音的频率和音量，可以进行的实验尤其多。你也可以测试同时使用两个滤音器的效果。例如，按下按钮，激活旁路电容器 C7，C7 阻断高频信号。同时用开关将 C4 连入电路，阻断低频信号。现在你做成了**带通滤波器**，它得名的原因是，你在此只允许中间的窄频带信号通过。

左下角的电位器为音量控制器，但是你会发现，只有它取中间阻值时电路才能正常工作。如果阻值太高或太低，电路就会开始振荡。这是放大器电路的常见问题，解决方法一般为在不同位置添加小电容器和大电容器。我决定不再为此费心，因为电位器中间的阻值可用。

电路中的电容器和线圈都在**无源**状态下工作。它们会阻碍一部分频率，但不会产生新的频率。更复杂的音频滤波系统使用晶体管提供有源滤波，但是需要用到更多的电子元件。

理论知识：波形

沿着与瓶口平行的方向吹气，你会听到圆润的声音，这是由空气在瓶子内振动引起的。如果你能画出来，压力波的波形应该是圆形。

如果你能放慢时间，画出住宅电源插座中的交变电压波形，它应该与上一种波形相似。

如果你能测量真空中钟摆来回摆动的速度，画出速度与时间的关系图，也应该得到相似的波形。

这个波形是**正弦波**，可以根据基本的三角函数得到。在直角三角形中，假设一条直角边为 a，用 a 的长度除以三角形斜边的长度，结果就是 a 边所对的角的正弦值。

说得再简单一点，请想象一个拴在绳子上的球，绕中心点转动，如图 5-48 所示。忽略重力、空气阻力和其他变量的影响，球匀速绕圆形轨迹运动。在一定的时间间隔下测量球的垂直高度，用它

除以绳子的长度。将测量结果绘成曲线，就得到了正弦波，如图 5-49 所示。请注意，当球运动到水平起始线以下时，我们认为它的距离为负，所以正弦波也进入负半轴。

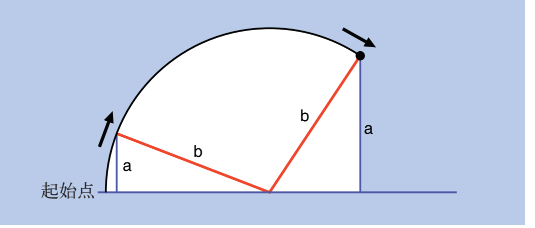


图 5-48　你可以利用简单几何学方法画出正弦波

这种波为何会以如此多的形式出现在自然界的各种地方？这是有物理根源的，如果你感兴趣，我就把这个问题留给你去探索。回到音频复制的主题上来，以下几点非常重要。

- 你周围空气的静压称为环境气压，是由空气所受重力产生的（是的，空气也有重量）。
- 几乎所有的声音都包含高于环境气压的压力波，后面紧跟低于环境气压的压力波，就像海浪一样。
- 我们可以用相对较高和较低的电压表示高压力波和低压力波，这就是我在图 5-49 中使用红蓝两色背景的原因。
- 任何声音都可以分解为各种不同频率和不同幅度的正弦波。

反之：

如果音频正弦波混合正确，你就可以制造任何声音。

假设有两个声音同时播放。图 5-50 分别用紫色和绿色画出了两个音频的波形。当两个声音作为压力波在空气中传播，或作为交变电流在导线中传播时，它们的幅度叠加，形成更复杂的波形，即图中的黑色曲线。现在请想象有数十个或数百个不同的频率同时叠加，你就会理解音乐作品波形如此复杂的原因了。

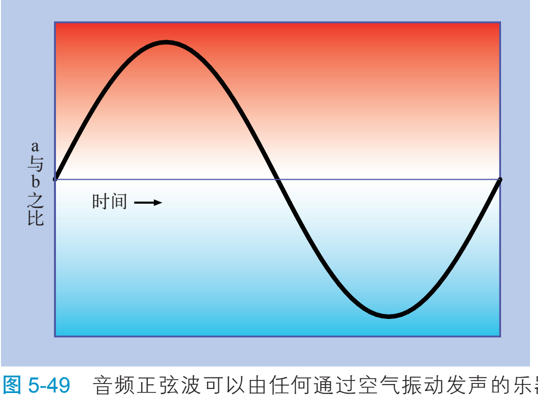


图 5-49　音频正弦波可以由任何通过空气振动发声的乐器产生，例如笛子；它是非常柔和、悦耳的声波

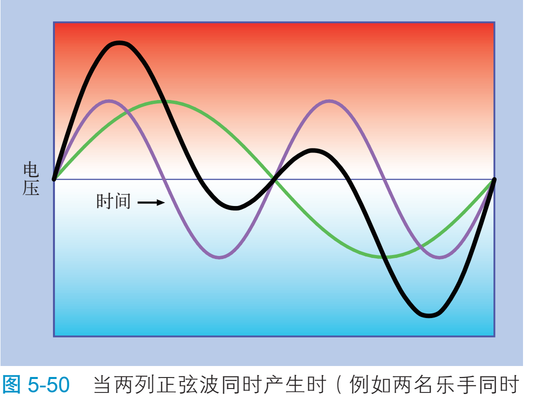


图 5-50　当两列正弦波同时产生时（例如两名乐手同时吹奏笛子），混合后的声音产生合成的波形。紫色正弦波的频率是绿色正弦波的两倍。合成波（黑色曲线）是两列正弦波到图表基线的距离之和

非稳态的 555 定时器能产生方波。这是因为定时器的输出突然从低变高，然后又从高变低。结果如图 5-51 所示。正弦波听起来柔和悦耳，变化平稳。方波听起来比较刺耳，并伴有嗡嗡声。嗡嗡声由谐波组成，谐波的频率是基础频率的两倍或更多。

因为方波包含高频谐波，所以它是测试音频滤波器的良好选择。只允许低频信号通过的低通滤波器会磨光方波的尖角，从而去除嗡嗡声。

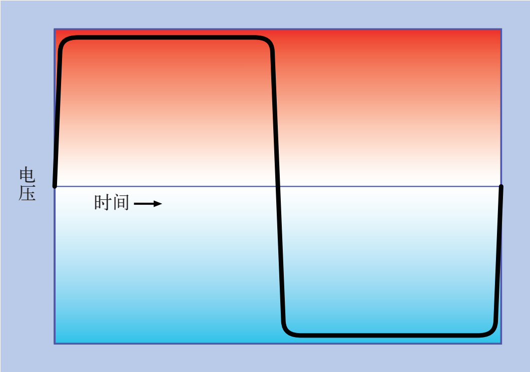


图 5-51　可能从 555 定时器获取的方波，555 定时器的输出剧烈地高低变化

改编音乐

你可能会想，如果 LM386 是音频放大器，那么它能放大音乐吗？当然可以，而且这实际就是它的设计目的。你可以使用任何带耳机输出的音响设备自己进行测试。

考虑到 LM386 只是单声道音频放大器，所以你无法在音乐播放器中同时听到两个声道的声音。为了获取单个声道的声音，使用两端各有一个小型耳机插座的电缆。剪下一个插座，剥除绝缘层，你会发现网状的细导线构成了电缆的屏蔽层，用于连接接地负极。屏蔽层内部是两根导线，分别传输左声道和右声道的信号。剪下其中任意一根扔掉，但是不要让电缆剩余部分中的导线与屏蔽层短接。

剥除剩下的导线的绝缘层。内部的导线非常细，如果稍微焊接一下，实验操作就会更加方便。理想结果如图 5-52 所示。

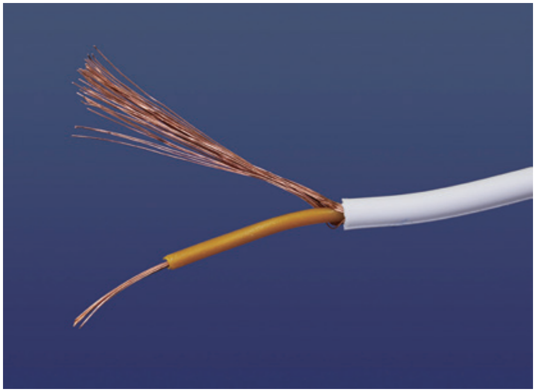


图 5-52　剥除了绝缘层的音频电缆，露出屏蔽层和一根导线。屏蔽层与接地负极相连

确保连接放大器电路的电源断开，并将所有的滑动开关滑到下方。移除连接 555 定时器 3 号引脚和下 220 μF 电容器的橘黄色导线。从电路中移除 555 定时器，使用电容器 C6 的正极作为输入点。

用弹簧夹测试引线固定电容器的正极引脚，将测试引线的另一端连接到电缆的音频导线上。用另一根测试引线连接电缆的屏蔽层和电路的接地负极。音乐播放器必须与放大器电路共同接地，这一点非常重要。

接通电源，然后打开音乐播放器，就可以听见音乐了。如果声音太大且失真，你可能需要在音

乐播放器的音频导线和电容器的正极之间连入 1 kΩ 或 10 kΩ 的电阻器。

音量调节适当后，就可以用高通和低通滤波器进行测试，观察它们对音乐的影响。听起来不会很悦耳，但是音效不一样。

背景知识：分频网络

在传统的音响系统中，每个扬声器箱包含两个扬声器：小扬声器叫作高音扬声器，播放高频声音；大扬声器叫作低音扬声器，播放低频声音。（现代音响系统通常把低音扬声器单独放置在一个盒子里，这个盒子几乎可以放在任何地放，因为人耳很难识别低频声音的方向。此系统中，低音扬声器也可以叫作低音炮，因为它可以播放频率非常低的声音。）

音频信号通过滤波后，分别进入高音和低音扬声器，这样高音扬声器就不用处理低频信号，低音扬声器也不用处理高频信号。实现信号分流的电路称为“分频网络”，铁杆唱片爱好者尤其喜爱自己搭建分频网络（尤其是在车载播放器系统中），配合自己选择的扬声器，安装在自己设计制造的音箱中。

如果你想搭建分频网络，可以使用高质量的聚酯电容器（它们没有极性，寿命比电解质电容器更长，质量更好）和圈数适合、大小适当的线圈，在适当的频率点分离高频信号。图 5-53 展示了聚酯电容器，图 5-54 展示了我在 eBay 网上花 6 美元买到的音频分频线圈。我很想知道它里面是什么样子，所以我把它拆开了。

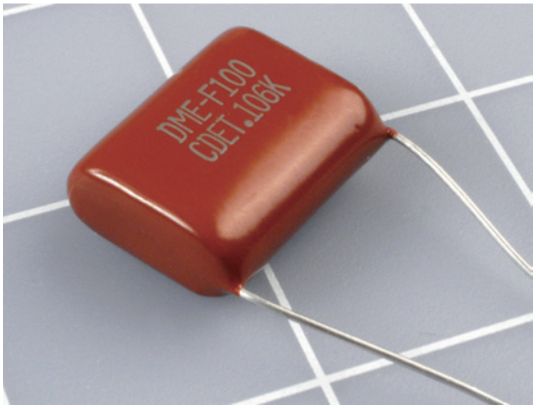


图 5-53　一些非电解质电容器没有极性，比如图中的高质量聚酯电容器

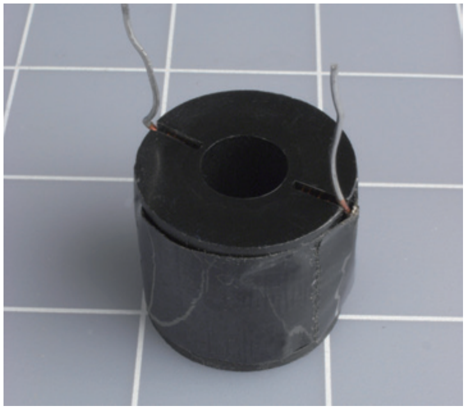


图 5-54　在这个高端的音频线圈里有什么奇异的元件吗

我首先撕下了包裹线圈的黑色乙烯基胶带，里面是一些普通的线圈线——用薄薄的虫胶或半透明塑料覆盖的铜线，如图 5-55 所示。我解开了线圈，同时数了数绕线圈数。

图 5-56 展示了线圈线和线轴。

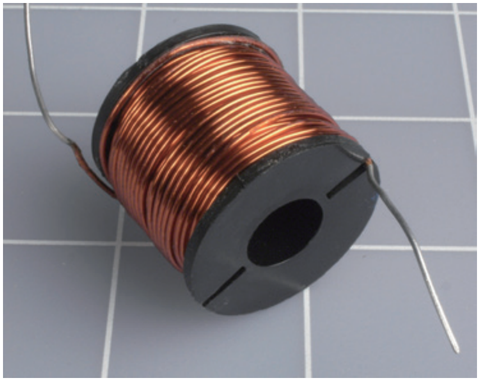


图 5-55　撕下黑色胶带，露出一卷线圈线



图 5-56　音频分频线圈由塑料线轴和铜线构成，没有其他结构

下面是音频分频网络线圈的规格：20 线规的铜质线圈线，长 40 英尺，绕塑料线轴 200 周。

我们可以得出结论，音频元件有许多奥秘。它们的定价通常过高，如果你根据以上参量，进行调整以适合自己的要求，也可以做出自己的线圈。

假设你想在自己的汽车里安装几个大功率低音扬声器，你能自己搭建滤波器，让它们只播放低频声音吗？当然可以——你只需绕制一个线圈，增加绕线圈数，让它尽可能地滤除高频信号。要确定导线足够粗，在音频功率达到甚至超过 100 W 时不会过热。

下面是另外一个可选项目：彩色风琴。你可以接入音响的输出，使用滤波器将音频信号分成三个部分，每部分信号驱动一套单独的彩色 LED。红色 LED 对应低频信号，黄色 LED 对应中频信号，绿色 LED 对应高频信号（你可以依据自己的喜好任选颜色）。你可以将信号二极管与 LED 串联，为交变电流整流；将电阻器与 LED 串联，限制 LED 两端的电压，比如，当音乐音量调到最大时，LED 两端电压为 2.5 V。使用万用表检测流过每个电阻器的电流，用测得值乘以每个电阻器两端的压降，得到电阻器的实际功率，以确认它能够在该功率下正常工作，而不会烧毁。

如果你喜欢设计和搭建自己的电路，音频领域可以为你提供无穷的可能性。

实验 30：让信号失真

让我们尝试一下实验 29 中电路的另一种形式。这个实验将说明音频电路的另一个重要属性：失真。

需要的工具

- ❒ 实验 29 中的面包板电路

- ❒ 2N2222 晶体管 1 个
- ❒ 电阻器：330 Ω 1 个、10 kΩ 1 个
- ❒ 电容器：1 μF 2 个、10 μF 1 个

电路微调

对电路的调整非常细微。你需要添加 1 个晶体管、2 个电阻器和 3 个电容器。图 5-57 展示了面包板顶端新加入的元件，而已有的元件画成了灰色。

图 5-58 展示了同样的元件，它们位于电路图的相关部分，标出了取值，省略了其他元件。

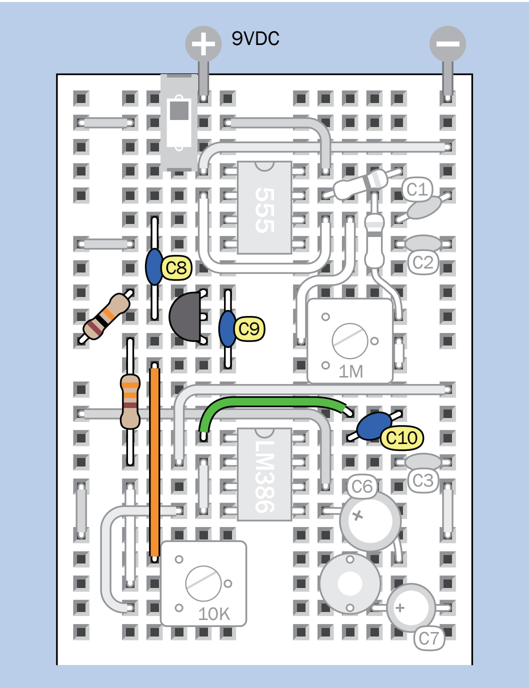


图 5-57　对实验 29 中的电路微调，以增加更多失真

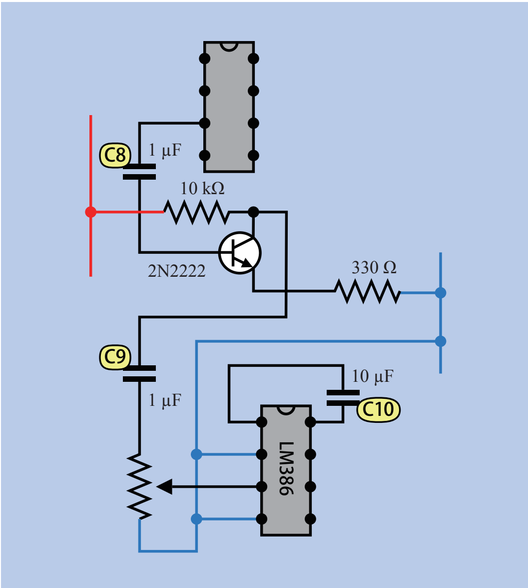


图 5-58　增加的元件及其取值

2N2222 晶体管使 LM386 的输入过载，同时 1 μF 的电容器 C8 和 C9 限制低频信号，强化失真效果。

C10 的目的是提高 LM386 的增益。这是芯片的特性之一：如果你在 1 号和 8 号引脚之间加入电容器，放大器的增益将从 20 : 1 增大到 200 : 1。

因此，这个可怜的小放大器正在通过两种途径被迫完成设计者期望之外的任务。自然，它要抱怨自己受到了残酷虐待。

完成调整后，接通电源。输出信号中原先有一些蜂鸣声，因为该信号基本由方波构成。但是如果你现在用 10 kΩ 和 1 MΩ 的电位器做实验，电路就会输出尖锐的声音，像美国吉他乐手吉米•亨德里克斯（Jimi Hendrix）的风格。

如果结果太极端，你可以拆除 330 Ω 的电阻器，用阻值略高的电阻器代替。电路中究竟在发生什么呢？

背景知识：削波

在 hi-fi（高保真）之声的发展初期，为了使音频复制的过程更加完美，工程师们付出了很大努力。他们希望放大器输出端的波形与输入端的波形完全一致，唯一的区别是输出波形幅度应该更大，大到足以驱动扬声器。波形有任何微小的失真都不能接受。

可是工程师们不知道，他们精心设计的电子管放大器被新一代的摇滚吉他乐手所滥用，后者希望尽可能多地产生失真。

如果你强迫真空管或晶体管以超过该元件自身能力的方式放大正弦波，它就会因功率不足而“削去”正弦波的顶端和底部。这样，波形看起来更像方波了。我在实验 29 中讲过，方波具有刺耳、嗡嗡响的特性。对于希望在音乐中加入锐利声音的摇滚吉他乐手来说，刺耳的声音是令人满意的特性。

图 5-59 中的一系列波形展示了削波失真发生时的情况。只要输出电压范围在放大器的额定电压范围内，信号就可以忠实地复制。但是在第 2 帧波形图中，放大器的输入变大，使得其输出超过限度（见波形的灰色部分）。因为放大器的功率只够放大黑色部分的波形，所以它给信号削波，如第 3 帧波形图所示。

对于摇滚吉他乐手而言，削波之后的声音听起来很好，他们还发明了“效果器”来产生削波

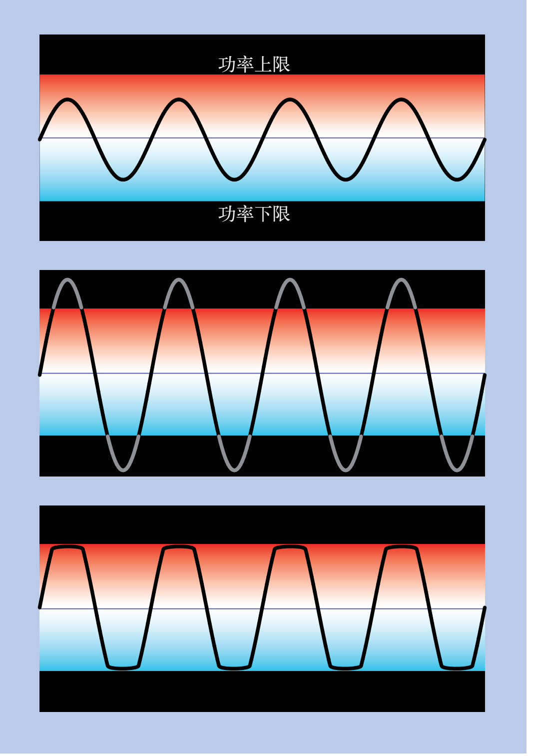


图 5-59　当正弦波（上图）通过元件功率超过限度的放大器时，放大器为波形削波（下图）

效果。图 5-60 展示了早期的效果器。

背景知识：效果器的起源

1962 年，冒险者乐队（Ventures）利用模糊音装置录制了第一首单曲，名为“The 2000 Pound Bee”。效果器确实是人们所制造的最糟糕的乐器之一，它拿失真效果要花招，音乐家一定得出过这样的结论：这种声音注定会消失。

然后奇想乐队（Kinks）的雷•戴维斯（Ray Davies）开始研究失真现象，他起初把一个放大器的输出连接到另一个放大器的输入，该实验可能是在他的畅销歌曲“You Really Got Me”录制过程中进行的。于是放大器的输入过载，产生削波，得到他想要的音乐。就在不久之后的 1965 年，滚石乐队录制“（I Can’t Get No）Satisfaction”时，凯斯•理查德兹（Keith Richards）使用了 Gibson Maestro 模糊音吉他。

今天，你可以见到数千种主张，受到推崇的“理想”失真理论几乎也有数千种。我在图 5-61 中展示了意大利电路设计者弗拉维奥•德列皮亚内（Flavio Dellepiane）提供的一幅电路图（http://redcircuits.com），也感谢谷歌广告联盟提供的帮助。

德列皮亚内是一位自学成才的创客，他的大部分知识来自电子杂志，例如英国出版的老杂志 *Wireless World*。在我引用的这个失真电路中，他使用由三个场效应晶体管（Field Effect Transistor，FET）构成的高增益放大器，该放大器能够逼真地模仿过载的电子管放大器发出的圆角方波。



图 5-60　这个发出哇哇声的模糊音效果器是早期效果器的一种，它故意引起了音频工程师数十年来一直避免的削波失真

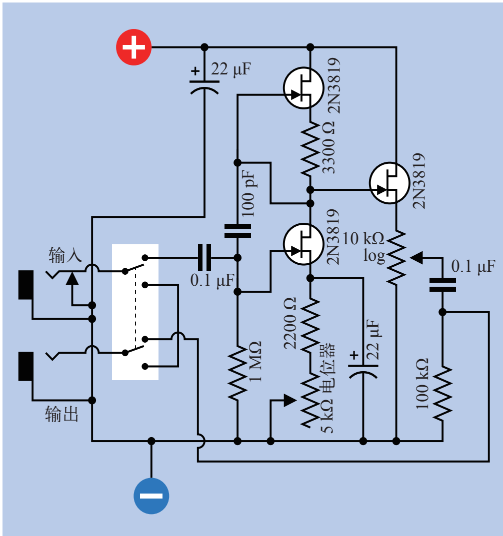


图 5-61　弗拉维奥•德列皮亚内设计的电路使用三个晶体管模仿电子管放大器输入过载而产生的失真

德列皮亚内还在自己的网站上提供了数十个电路图，他使用双通道示波器、低失真正弦波振荡器（这样在使信号失真之前，他可以为音响设备提供“干净”的输入）、失真测试仪和精密音频电压表设计并测试电路。振荡器和电压表都是德列皮亚内自己设计制造的，他也提供了这些仪器的电路图。因此，他的网站为寻求自己主导学习的家庭电子音响爱好者提供了一站式购物服务。

在失真音之前还有震音（tremolo）。很多人将它的概念与颤音（vibrato）相混淆，所以现在让我们来说明它们之间的区别。

- 颤音指频率上下变化的声音，好似吉他手在弯曲吉他的弦。
- 震音指音量大小变化的声音，好似有人以非常快的速度来回旋转电吉他的音量旋钮。

哈里 • 德阿蒙（Harry DeArmond）卖出了第一个震音盒，起名为 Trem-Trol。它看起来像老式的手提收音机，前面有两个刻度盘，顶端有手柄。可能是为了节约成本，德阿蒙没有使用任何电子元件。他的蒸汽庞克式震音盒内置电机，用锥形轴固定，上面压有橡胶轮。转动手柄，调整橡胶轮沿轴上下移动时，轮子的转速改变。轮子转而用曲柄启动一个小“液体”胶囊，胶囊中浸泡着两根导线，携带音频信号。随着胶囊前后摇晃，液体从一边泼洒到另一边，而电极之间的阻值产生波动，因此调节了音频输出。

如今，Trem-Trol 震音盒成了值得收藏的古玩。约翰 • 博卡德（Johann Burkard）上传了德阿蒙的 Trem-Trol 震音盒的 MP3 文件（http://bit.ly/tremolo-clip），你可以听到这段录音。

利用机械方法调节电子声音的实践没有就此结束。最早的哈蒙德电子琴独特、丰富的声音来自电机驱动的一套齿轮。每个齿轮在传感器中产生波动的电感，这些传感器类似磁带录音机的记录磁头。

想象一下电机驱动的其他效果器也很有趣。回到颤音上面，想象一张涂有黑色颜料的透明光盘，上面有一条两端逐渐变细的透明圆形条带。当光盘旋转时，如果让一个明亮的 LED 透过透明的条带照射光电晶体管，就具备了颤音设备的基础。通过收集具有各种条带图案的光盘，你甚至可以创造从未听闻的颤音效果。图 5-62 展示了我的构想，图 5-63 展示了一些条带图案。若想挑战一下真正的制造过程，试试自动换碟机如何？

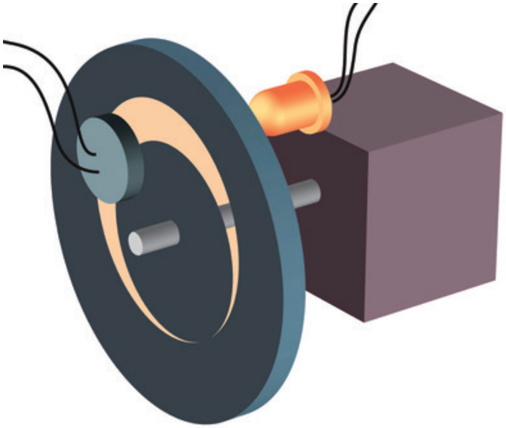


图 5-62　假想的新型机电震音发生器

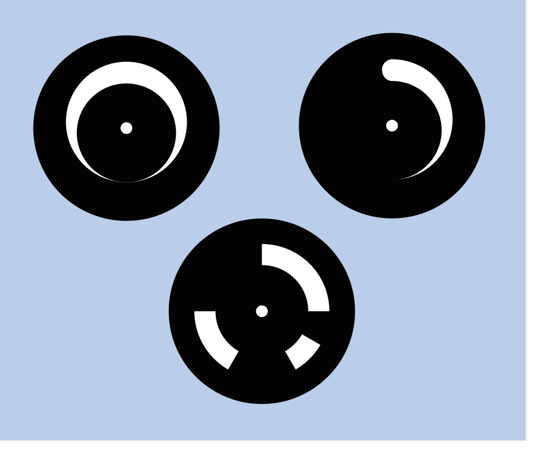


图 5-63　不同的条带图案可以用来产生多种震音效果

在固态电子元件的世界中，今天的吉他手可以选择多种多样的效果，这些效果都可以利用网上提供的方法自己合成。请参考这些特殊的兴趣类书籍。

汤姆 • 修斯（Tom Hughes）所著 *Analog Man's Guide to Vintage Effects*：你能想象到的所有老式效果器和脚踏板都能从这里找到制造指南。

布莱恩温普勒（Brian Wampler）著的 *How to Modify Effect Pedals for Guitar and Bass*：对于缺乏基础知识的初学者来说，此书是一本极为详尽的指南。目前它只提供下载版本，从 Open Library（http://www.openlibrary.org）等网站获得，也可以通过搜索标题和作者找到以前出版的二手书。

当然，你也可以走捷径。你可以花上几百美元，购买现成的效果器，它使用数字处理方法模拟失真、金属、模糊音、和声、移相器、镶边、颤音、延迟、混响等效果，只需一个器件就能搞定。当然，纯化论者会声称“音效不太纯正”，但这不是重点。有些人只有自己搭建效果器，然后进行调试，直到听见它发出完全自创的声音才会满足。

实验 31：无电源、无焊接的收音机

回到电感的原理上来，我想向你展示电感如何使简单电路在不接通电源的情况下接收调幅电波信号。这种装置通常叫作晶体收音机，最早的型号使用天然矿物晶体，功能类似于半导体。晶体收音机出现在电子通信发展的初期，但是如果从未尝试过搭建它，你就错过了一次真正魔幻的经历。

需要的工具

- ❒ 结实的圆柱形物体 1 个，直径约 3 英寸，例如维生素药瓶或水瓶
- ❒ 连接线，22 线规，至少长 60 英尺
- ❒ 较粗的导线，最好为 16 线规，长 50~100 英尺 , 可以是绞线，也可以使用更细的导线以减少成本，但是你的收音机可能收不到太多的广播台
- ❒ 聚丙烯（丙纶）绳或尼龙绳，10 英尺
- ❒ 锗二极管 1 个
- ❒ 高阻抗耳机 1 个
- ❒ 测试引线 1 根
- ❒ 弹簧夹 3 个，或使用另外的测试引线

以下是可选工具。

- ❒ 9 V 电源（电池或交流适配器）
- ❒ LM386 单芯片放大器
- ❒ 小扬声器（直径 2 英寸）

二极管和头戴式耳机可以从 Scitoys Catalog（http://www.scitoyscatalog.com）购买，而高阻抗耳机也可以从亚马逊网上买到。

第 1 步：线圈

你需要制作一个线圈，让它与调幅频带中的无线电信号产生共振。线圈由 65 圈 22 线规的导线绕成，总长约 60 英尺。

你可以将线圈绕在空玻璃杯或塑料容器上，只要它的各边平行，且直径恒定为约 3 英寸即可。水瓶就可以满足条件，只要其材质不是易碎、易受压变形的薄塑料。

我恰巧有一个尺寸合适的维生素药瓶。在照片中，你会发现它没有标签。我用热风枪使标签变软（轻轻地加热，以避免熔化瓶子），然后将其撕下。标签的残余部分用二甲苯擦去。

准备好干净、坚固的瓶子以后，使用尖锐的物体（例如锥子或钉子）在瓶身上打出两对小孔，如图 5-64 所示。小孔用来固定线圈的两端。

从连接线两端剥下一段绝缘层，将它固定在一对小孔上，如图 5-65 所示。接着，将导线绕瓶身五周，并用一小片胶带帮助导线固定，防止其松动。牛皮胶布比较理想，或者常用的透明胶带也可以。“魔术”胶带的粘性不强，也难以移除。

下一步，你需要从导线上剥离约半英寸的绝缘层，现在你应该能把线圈安装在瓶子上了。使用剥线钳，在绝缘层上切出一个切口，然后沿导线将绝缘层拉下，如图 5-66 所示。



图 5-64　小孔用于固定绕在瓶身上的导线

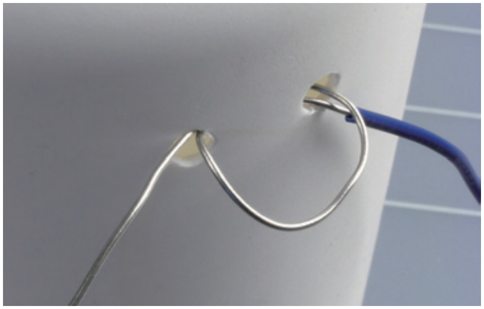


图 5-65　将导线的一端固定在一对小孔上

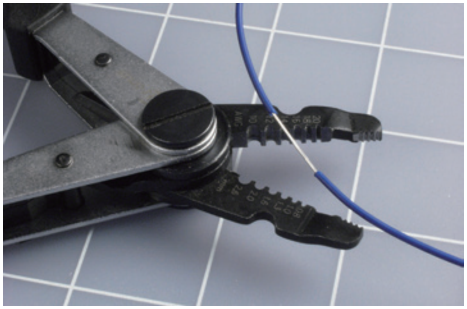


图 5-66　用剥线钳和手指将绝缘层向后拉约半英寸

下一步是将裸露的导线拧成环，使它突出，并防止绝缘层靠近。如图 5-67 所示。

你刚刚在线圈上做了一个**搭接点**。揭下临时固定前五圈绕线的胶带，在瓶子上继续绕线五圈。再次用胶带固定绕线，做出另一个搭接点，一共需要做 12 个。即使搭接点的位置没有精确对齐也没有关系。做好最后一个搭接点以后，再继续绕线五圈，并剪断导线。将导线的末端弯成 U 形，直径约半英寸，这样你就可以把导线钩在瓶子底部的小孔上了。将导线穿过小孔，然后绕一个小圈，形成牢固的定位点。

我用维生素药瓶绕成的线圈如图 5-68 所示。



图 5-67　将裸露部分的导线拧成圆环

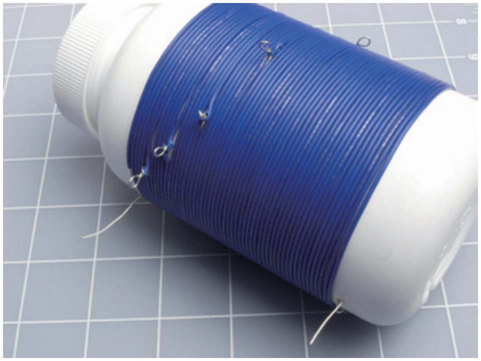


图 5-68　完成的线圈紧紧绕在瓶子上

下一步是架设天线。做天线的导线要尽量粗、尽量长。如果你居住的房屋外面有院子，架设天线就很容易了，只需打开窗户，扔出一卷 16 线规的导线，握住自由端，然后出门，用五金店里很容易买到的聚丙烯（丙纶）绳或尼龙绳悬挂天线，注意要远离树木、水沟或杆子等物体。天线的总长应为 50~100 英尺。在窗口处用另一根丙纶绳悬挂天线，目的是使天线尽量远离地面或任何接地的物体。

如果你没有自己的小院，也可以把天线悬挂在室内，用丙纶绳或尼龙绳将天线挂在窗帘、门把手或任何可以使其远离地面的地方。天线不需要保持笔直，你可以环绕房间布置它。

注意：小心高电压！

我们周围的世界充满了电。我们通常察觉不到电的存在，但是雷阵雨会突然提醒你：在地面和天空的云层之间存在着巨大的电势差。

如果你架设了室外天线，一定不要在可能有雷击的情况下使用，这会非常危险。断开天线的室内一端，将它拖到屋外，把天线末端插进地下，进行安全处理。

天线和接地

使用弹簧夹测试引线将天线的末端与你做好的线圈上端连接在一起。

下一步是埋设接地线，这根线要与室外的大地相连接。理想情况下，你应该将几英尺长的裸导线埋在松软、潮湿的土壤中，但是如果你和我一样居住在沙漠地带，可能会比较困难。如果你要使用从电子产品批发商处购买的接地桩给焊接设备接地，一定要注意打桩的位置，你可不想破坏任何地下的管道吧。

人们通常觉得冷水管是良好的接地材料，但是只有管子用金属制成时才有效。即使你的住房管道是用铜管铺设的，也可能会有一部分管道在过去用塑料管修葺并代替。

或许最可靠的选择方案是将导线连接到电源插座盖板的螺钉上，因为你家的电路系统最终会接地。但是一定要将导线固定好，让它没有碰到插座插孔的风险。我不推荐将地线安装到插座的地线插孔中，因为存在使它误碰到火线的危险。

现在你需要几件有点难找的物品。你需要锗二极管，它的作用类似于硅基二极管，但是更适合在你要遇到的低电压、小电流下工作，也适合高阻抗耳机。你用来听音乐播放器的耳机并不能用于此项目，耳机必须是老式的，如图 5-69 所示。如果它一端有插头，那么你需要把插头剪掉，然后小心地剥下每根导线尖端的绝缘层。

各部件用测试引线和弹簧夹连接，如图 5-70 所示。我实际搭建的电路不像示意图这样整洁，但是连接点相同，如图 5-71 所示。请注意，底部的测试引线可以固定到线圈的任一搭接点上，这就是你为收音机调台的方式。

如果你完全按步骤进行制作，居住地点在调幅广播电台周边 20~30 英里的范围内，且听力良好，你就能通过耳机听见电台微弱的广播——即使你没有为电路提供任何电源。这个项目已经有数十年的历史了，但仍能带来惊喜和神奇（如图 5-72 所示）。

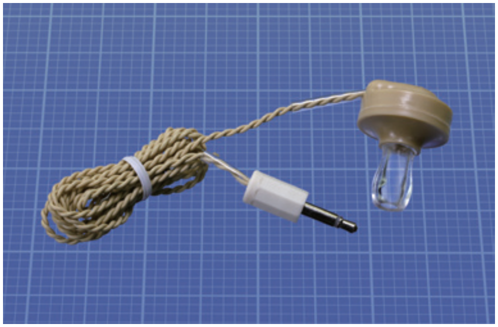


图 5-69　这是你的无电源收音机所需的耳机

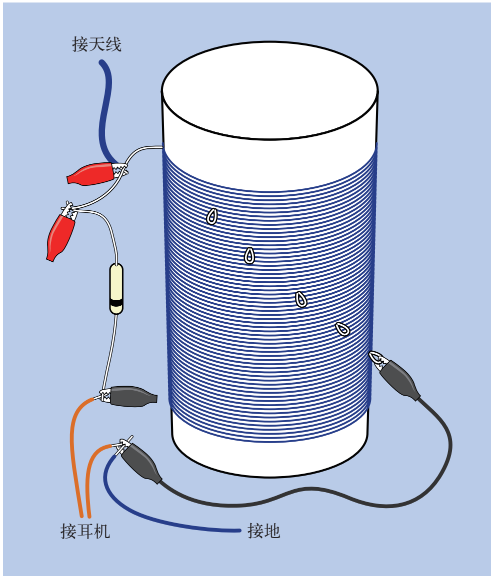


图 5-70　组装好的元件



图 5-71　实际搭建的电路



图 5-72　使用非常简单的元件，不加电源接收广播信号，也有简单的乐趣

如果你的居住地距离广播电台太远，或是难以架设太长的天线，又或者不能良好接地，你可能什么都听不到。但是不要灰心，请等到日落时分。当太阳不再照射大气层时，调幅电波的接收会发生显著变化。

调台时，将测试引线末端的弹簧夹从一个搭接点移动到线圈的另一个搭接点上。因你的居住地点而异，你可能会收听到一个电台或多个电台，它们单独播放或同时播放。

这看起来似乎是无中生有，但是你实际上从功率源——电台的发射机获取了能量。发射机将电能输送到广播塔，调制固定的频率。当线圈和天线的组合与该频率共振时，收音机就接收到了足够的电压和电流，用于激励高阻抗耳机。

电路需要良好接地，因为电流只有在有处可去的情况下才能流过线圈。你可以将大地想象成几乎无限大的电流宿，参考电压为零。调幅广播电台的发射机也可能具有一定的对地电势。如图 5-73 所示。

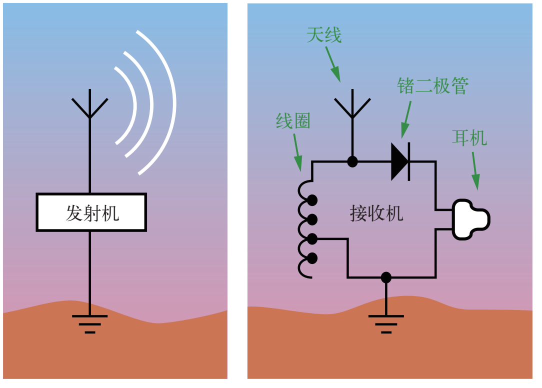


图 5-73　无电源收音机从远端发射机获取足够的能量，在耳机中产生很小的声音

功能增强

如果你从耳机听不到任何声音，可以尝试使用压电式转换器，也叫压电式蜂鸣器。你需要使用内部未安装振荡器的无源类型，类似于扬声器。把它紧紧按在耳朵上，你可能会发现它的性能像耳机一样好，甚至更好。

你也可以尝试放大信号。理想情况下，你应该在第一阶段使用放大器，因为它的阻抗很高。但是，我决定在 *Make: More Electronics* 一书中使用放大器，这样我就可以有足够的篇幅更加透彻地讲解这个问题。作为替代方案，你可以将信号直接输入实验 29 中的 LM386 单芯片放大器。

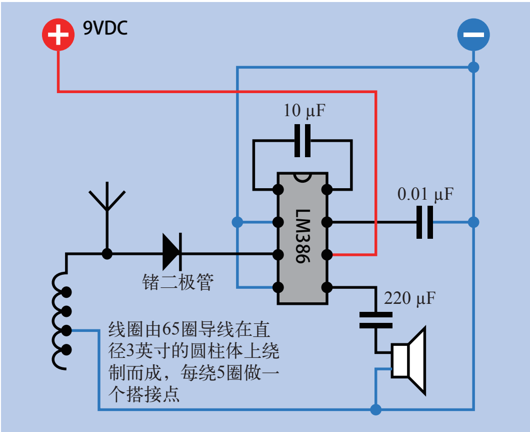


图 5-74　LM386 单芯片放大器可以让你的晶体收音机通过扬声器发声

图 5-74 展示了电路何其简单。锗二极管可以直接与 LM386 芯片的输入连接，因为我认为你并不需要控制音量。一定要在 1 号引脚和 8 号引脚之间连入 10 µF 的电容器，将芯片的放大倍数增加到最大。就连我居住的地方（距离亚利桑那州菲尼克斯市约 120 英里远）都能收到从菲尼克斯地区发出的广播。

若想提高收音机的选择性，可以连入可变电容器，更加精确地调节电路的共振。可变电容器如今已不太常见了，但你可以在我推荐购买耳机和锗二极管的那家专卖店买到：Scitoys Catalog（http://www.scitoyscatalog.com）。

该网站由西蒙 • 克尔兰 • 菲尔德（Simon Quellan Field）创建运行，网站上有很多有趣的项目，你可以在家进行实验。他有一个好主意，从收音机电路中移除锗二极管，用低电流 LED 与串联的 1.5 V 电池代替。这个方法并不适合我，因为我住在偏远地区；但是如果你距接收机较近，这样做你就能够看到 LED 的亮度随着通过它的电波能量而改变。

理论知识：收音机的工作原理

高频电磁辐射可以传播数公里。为了制造无线电发射机，我可以让 555 定时器芯片以（例如）850 kHz（每秒 850 000 个周期）的频率运行，让产生的脉冲流通过非常强大的放大器，进入发射塔，或只是一段很长的导线。如果你有方法阻挡空气中所有其他的电磁场，就可以检测到我的信号并将其放大。

这基本就是伽利尔摩 • 马可尼（Guglielmo Marconi）在 1901 年进行开创性实验时所做的工作，

只是他当时不得不使用原始的火花隙而非 555 定时器产生振荡。他的传输装置用途有限，因为它们只有两种状态：开或关。你可以发送莫尔斯编码信息，但是仅此而已。

马可尼的肖像如图 5-75 所示。

五年后，第一个真正的音频信号通过将频率较低的声音信号加在频率较高的载波信号上传送成功。也就是说，音频信号“加”在了载波频率上，因此载波功率随音频信号的峰值和谷值而变化。如图 5-76 所示。

在接收端，电容器和线圈的简单组合将载波频率从电磁频谱的背景噪声中检测出来。电容器和线圈的取值是经过选择的，要使电路的共振频率与载波相同。基本电路如图 5-77 所示，可变电容器用中间有箭头穿过的电容器符号表示。



图 5-75　伽利尔摩 • 马可尼，无线电的伟大先驱（照片来自维基共享资源）

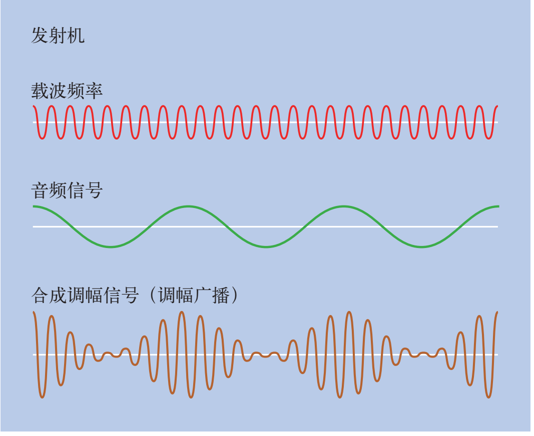


图 5-76　以固定频率的载波传输音频信号

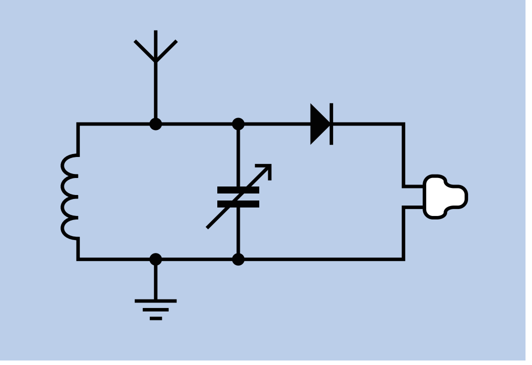


图 5-77　当可变电容器连入原先的电路中时，电路从频谱中分辨不同信号的能力加强

载波上下波动的速度太快，耳机难以跟上电压的正负变化。它会在电压中点处静止，不发出声音。二极管解决了这个问题，它阻碍了信号的下半部分，只留下正电压峰值。虽然信号仍然很小，速度也很快，但是它们现在都向一个方向推动耳机的膜片，最终达到平衡，近似重建出原始声波，如图 5-78 所示。

当接收机电路中加入电容器时，接收机输入的脉冲最初被线圈为电容器充电时的自感所阻碍。如果在一段时间间隔（与线圈和电容器的取值恰当同步）后接收到同样大小的负脉冲，就会与电容器放电和线圈导通的时间一致。这种方式下，载波的正确频率就会使电路和谐地共鸣。与此同时，音频信号的幅度变化转化为电路的电压波动。

天线接收的其他频率的信号都去哪儿了？较低频率的信号通过线圈传导至地，较高频率的信号通过电容器传导至地。它们都被“丢弃了”。

调幅电波分配的载波频率范围是 300 kHz~3 MHz。其他的很多频率用于特殊用途，例如业余无线电。通过业余无线电考试并不困难，使用合适的设备，天线架设在有利的位置，你就可以与遍及各处的人们直接谈话了，并不需要借助任何通信网络的连接。

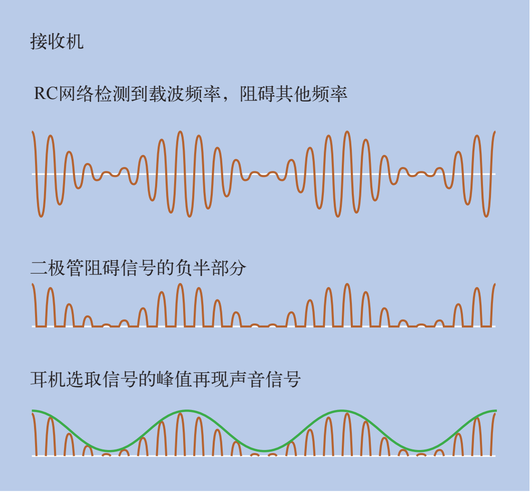


图 5-78 简单的调幅电波接收机如何解码信号并在耳机中再现声音

实验 32：当硬件遇到软件

我猜测本书的大多数读者应该都听说过 Arduino。本实验和下面的两个实验将向你展示如何设置微控制器并写入程序，而不是仅仅从网上下载应用到控制器中。

需要的工具

- ❒ Arduino Uno 电路板或兼容复制品 1 个
- ❒ 两端分别有 A 类和 B 类连接器的 USB 线 1 根
- ❒ 有可用 USB 端口的台式或笔记本电脑 1 台
- ❒ 通用 LED 1 个

定义

微控制器是一种开发平台，工作形式类似于小型计算机。用户编写程序，包含微控制器可以理解的指令，并将程序复制到芯片的存储器中。存储器是非易失性的，意味着即使你切断电源，内容也会妥善保存。

一般，我会建议直接参与编写程序，但是微控制器的学习相比前面讲解过的元件需要投入更多的时间和精力。如果不了解更多的细节，你怎能知道自己是否愿意进入这个领域呢？因此，我必须从解释说明和研究方向讲起。之后，本实验将带领你熟悉设置微控制器及进行最基本的测试的流程。实验 33 和实验 34 将带你深入了解 Arduino 微控制器编程和使用相关元件的方法。

现实生活中的应用

典型的微控制器应用方法一般如下。

- ❐ 从旋转编码器接收输入。旋转编码器在车载立体声收音机上作为音量控制器使用。
- ❐ 判断编码器的旋转方向。
- ❐ 计算编码器输出的脉冲个数。
- ❐ 告知可编程电阻器它应该采取多少等效步长，由此上下调节音响的音量。
- ❐ 等待更多的输入。

微控制器可以完成更大型的应用，例如与实验 15 防入侵报警器相关的所有输入、输出和决策。它可以扫描传感器，在一段延迟后通过继电器激发警笛；当你想关闭报警器时，它可以接收并核实密码键盘输入的序列，等等。

所有的现代汽车都包含微控制器，它们完成复杂的任务，例如设定发动机的点火时间；也完成简单的任务，例如在你未系紧安全带时发出铃声。

微控制器可以完成我在前面实验中讲述过的小而重要的任务，例如防止按钮开关颤动或产生音频信号。

既然一个小芯片有这么多不同的功能，我们为什么不用它完成所有的任务呢？

完成工作的正确工具？

微控制器功能强大、用途广泛，但某些场合比另一些场合更加适合使用微控制器。它非常适合按照流程进行逻辑操作：“如果 A 发生，则执行 B；但是如果 C 发生，则执行 D”，但是它增加了项目的成本和复杂度，当然使用者也必须进行大量的学习，以掌握微控制器使用的计算机语言。

如果你不想学习编程语言，也可以下载别人已经编写好的程序使用。很多人选择了这个方法，因为结果即刻可得。你可以在网络图书馆中找到上千种 Arduino 程序，都是免费的。

但是别人编写的程序不一定能完全实现你的需求，对其进行修改是不可避免的。结果你会面临这样的情况：你需要理解编程语言，以实现对芯片的完全利用。

对于一些应用，Arduino 的编程可以很容易，但是也不能一蹴而就。代码需要测试，而修正和调试过程很费时间。一个小错误就会造成难以预料的后果，或者让程序无法运行。你需要重新阅读代码，找到错误，然后再次尝试。

一切正常运行后，结果会令人印象深刻。因此，我个人认为值得用微控制器做做编程，只要你真的有这个愿望。

如果你想要积极达成一项目标，就需要自己努力尝试。

一个电路板，多个芯片

我将从最基本的问题开始讲述。什么是 Arduino 微控制器？

如果你认为它是芯片，那么你并不完全正确。Arduino 的每件产品都由一个 Arduino 设计的小电路板组成，其中包含由完全不同的公司生产的微控制器芯片。Arduino 微控制器板使用 Atmel ATmega 328P-PU 微控制器芯片。电路板上还安装了电压调节器、导线或 LED 的插座、晶体振荡器、电源连接器，以及允许计算机和电路板连通的 USB 适配器。请参考图 5-79 中的电路板照片，上面标明了一些元件。

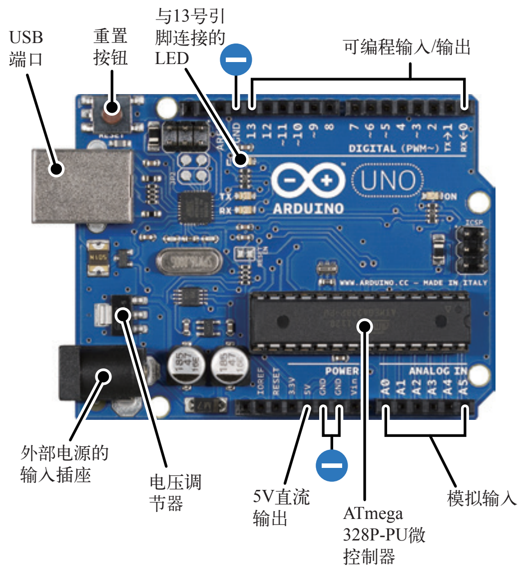


图 5-79　Arduino 电路板，由 Atmel 生产，型号为 ATmega 328P-PU

从元件供应商处自己购买 ATmega 328P-PU 微控制器芯片，价格还不到包含芯片的 Arduino 电路板零售价格的六分之一。既然如此，为什么要为了一块小电炉多花这么多钱呢？答案是，电路板的开发及其使用所必需的智能软件非同小可。

该智能软件叫作 IDE，即 Integrated Development Environment（集成开发环境）的缩写。将它安装在计算机上，IDE 会提供人性化界面，供用户编写和编译程序。编译指将 C 语言指令（用户可以理解）转换成机器代码（Atmel 芯片可以理解）。然后将编译好的程序复制到 ATmega 芯片中。

为避免混淆，我将上述内容总结如下。

- ❒ Arduino 是电路板，上面插有 Atmel 微控制器。
- ❒ Arduino 公司编写的 IDE 软件能让你在计算机上编写程序。
- ❒ 程序写好后，IDE 软件编译程序，生成芯片能够理解的代码。
- ❒ IDE 软件将代码传送给 Atmel 芯片，芯片储存代码。

代码存入芯片后，芯片就不需用到 Arduino 电路板了。理论上，你可以给 ATmega328 断电，把它用到其他地方——面包板或电路中，在它周围焊接元件。芯片仍将执行程序规定的任务，因为代码

仍保存在芯片内。

实际上，芯片的移植会遇到一些小障碍，但是你可以通过阅读艾略特·威廉姆斯（Elliot Williams）所著的 *Make: AVR Programming* 一书来了解相关信息。此书准确地向你讲解了如何移植 ATmega 芯片。

学会芯片移植意义重大。你只需购买一块 Arduino 电路板，而可以廉价购买大量的 Atmel 芯片。将一片芯片插入电路板，进行编程再将它取下，把它用在独立的项目中。向电路板中插入另一片芯片，在芯片中导入不同的程序，然后在另一个项目中应用。

如果你购买的 Arduino 电路板上，微控制器是安装在插座上的通孔芯片，芯片移植就较易实现。你可以用小螺丝刀把芯片撬出来，用拇指和食指插入另一片芯片。（另一种电路板上的微控制器是表面安装类型，焊在电路板上。这种电路板上的芯片不可移动。）

小心仿制品?

讲解完基础知识后，我将讲解如何设置电路板。

Arduino 电路板有各种型号，但是我此处要使用的型号是 Arduino Uno，编程指令适用于 R3 或更新版本。

你可以从很多地方买到 Arduino 电路板，因为它作为“开源”产品生产和制造，允许任何人制作拷贝，就如任何生产商都可以生产 555 定时器一样（不过原因略有不同）。

Mouser、Digikey、Maker Shed、Sparkfun 和 Adafruit 都销售正版 Arduino 产品。但是，在 eBay 网上，你会遇到**未获许可**的 Arduino 电路板，售价只有其他产品的三分之一。你会发现产品上没有印刷 Arduino 标志。为了帮助你识别真品和仿制品，请参考图 5-80 中的标志。

图 5-80　只有 Arduino 生产或许可的电路板上有此标志

未获许可的电路板是完全合法的，这与购买盗版软件或音乐不同。Arduino 只控制商标的使用，其他生产商不会使用它的商标。（实际上，有些骗子非法使用商标，但是你可以分辨出电路板的真伪，因为假的太便宜了。）而使事情更加复杂的是，Arduino 与前生产商之间存在纠纷，所以在美国境外销售的 Arduino 电路板真品都以 Genuino 的名称出售。

如果你买到了仿制电路板，它是否可靠呢？我会信任 Adafruit、Sparkfun、Solarbotics、Evil Mad Scientist 和另外几家生产商的产品。我无法全部购买并测试一遍，因此你需要根据其他购买者的反馈以及对供应商的整体印象自己做出决定。但是请记住，你只需购买一块电路板，然后就可以遵照我上文叙述的计划，用它给多片 Atmel 芯片编程了，因此多花一点钱购买 Arduino 电路板真品可能并不

是大事。这样却能帮助公司在未来继续研发新产品。

我自己购买了正版的 Arduino 电路板。

设置

假设你已经购买了 Arduino Uno 电路板或可靠的仿制品，你还需要一根标准 USB 连接线，一头是 A 类插头，另一头是 B 类插头，如图 5-81 所示。在你单独购买电路板时，这根线通常不附带赠送。如果你没有多余的连接线，可以在设置电路板和进行初始测试时借用其他设备的连接线。USB 连接线通常在 eBay 网等网站上有售，价格低廉。



图 5-81　你需要用这种 USB 连接线连接 Arduino 电路板和计算机的 USB 端口

有了电路板和连接线，下一步是下载 IDE 软件。访问 Arduino 的网站（http://www.arduino.cc），点击“下载”列表，选择适合你计算机的 IDE 软件。目前有适合 Mac OS、Linux 和 Windows 系统的各种软件。我使用的软件版本为 1.6.3，但是使用指南也适合后续版本。IDE 软件可以免费下载。

请注意，你的计算机系统版本需要为 Windows XP 或更新版本，Mac OS X 10.7 或更新版本，Linux32 位或 64 位系统。（这些要求也适用于编程环节。Arduino 未来可能会改变要求。）

三种不同操作系统的设置方法如下所示，这些方法主要基于马西莫 • 班兹（Massimo Banzi）和迈克尔 • 夏伊洛（Michael Shiloh）写的入门指南 *Getting Started with Arduino*。你也可以在 SparkFun（http://www.sparkfun.com）和 Adafruit（http://www.adafruit.com）等网站上查找安装指南。最后，Arduino 的网站（http://www.arduino.cc）上也有使用指南。

遗憾的是，所有指南都略有不同。例如，Arduino 的网站告诉我在运行安装程序之前先连接电路板，但 *Getting Started with Arduino* 一书告诉我在连接电路板之前先运行安装程序。这让我很是为难，因为 Arduino 的网站和 *Getting Started with Arduino* 一书都是 Arduino 的开发者合作编写的。

下面我要讲解每种系统的软件安装方法。

Linux 系统安装

这可能最为困难，因为 Linux 操作系统的版本非常繁多。建议你参考 Arduino 的网站（http://playground.arduino.cc/learning/linux）。

很遗憾，我无法帮助你解答 Linux 系统的问题。

Windows 系统安装

我倾向于遵照 *Getting Started with Arduino* 一书推荐的步骤。Sparkfun 的网站上也有相同内容。

先不要连接电路板。首先，确认你下载的 IDE 安装程序。它的名称可能是这样的：arduino-1.6.3-windows.exe。当你阅读本书时，版本号肯定已经更新了。文件名后缀 .exe 可能看不见，这取决于你的计算机系统设置。

> 有些指南说明下载的安装程序为压缩包形式，需要解压缩。但是我可以确定，Arduino 已经不再使用压缩包形式。你可以直接运行安装程序。

双击图标，你会看到安装序列，你在安装其他供应商的软件时也见过类似的序列。

你需要同意许可协议的条款（如果不同意，你将无法运行软件）。

系统会询问你是否要在桌面和开始菜单中创建快捷方式。请在桌面上创建快捷方式，开始菜单由你决定。

系统还会请你选择安装 IDE 软件的文件夹，你可以接受默认的安装路径。

如果你和我一样是个老古板，仍在使用 Windows XP 系统（实际上，还有好几百万人像我们一样），你可能会见到如图 5-82 所示的警告。实际的界面会因操作系统而异。请忽略警告，点击“继续安装”。如果系统请求安装设备驱动程序，选择“是”。

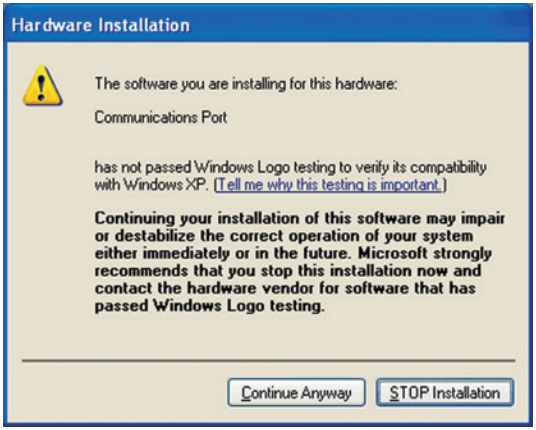


图 5-82　老式 Windows XP 操作系统的用户可以忽略该警告

> Windows 8 操作系统的安全特性会阻止你安装未签名的设备驱动程序。版本较新 Arduino IDE 在安装程序时应该不会遇到这个问题，但是如果从某处获取了更老的安装版本，你可以用 Google 搜索：“sparkfun 禁用驱动程序签名”，网页会引导你进入包含有用建议的 Sparkfun 网页。

安装好 IDE 软件后，用 USB 连接线将 Arduino 电路板与计算机连接。

只要 Arduino 电路板与计算机通过 USB 端口连接，你就不需要使用电路板上的圆形电源插头。电路板通过 USB 连接线接收电能。请注意，越短、越粗的连接线越能降低压降。而且，如果你使用的是笔记本电脑，尤其是老式的笔记本电脑，它可能会将 USB 端口的输出电流限制在 250 mA。即使笔记本电脑应该通过 USB 端口输出 500 mA 的电流，它可能也要被分散到三至四个 USB 端口上。外部硬盘等设备可能占用大量的电流。

观察电路板，等待它被计算机识别。你会看见绿色的 LED 稳定发光，黄色的 LED 闪烁，电路

板上附近标为 TX 和 RX 的 LED 短暂闪烁。它们显示数据正在进行传输和接收。

在计算机上找到 IDE 软件的快捷方式，名字就是“Arduino”，安装程序把它放置在桌面上。如果你不想在桌面上看到它，可以把它拖到别的位置。双击图标，运行 Arduino IDE 软件。

在打开的软件的窗口中，拉下“工具（Tools）”菜单，进入“端口（Ports）”子菜单 [Mac 系统现命名为“串行端口（Serial Ports）”]，你会看到计算机上的一列串行端口。它们的名称是 COM1、COM2，等等。

什么是串行端口？使用早期 Windows（之前是 MS-DOS）系统时，计算机没有 USB 连接器，它们使用 D 形连接器执行“串行协议”，计算机向连接器分配“端口号码”以与之保持联系。Windows 系统仍然内置此系统，尽管数十年已经过去，串行协议也很少用于家庭应用。

你只需知道 Arduino IDE 软件和 Windows 是否就 Uno 电路板所分配的端口号码达成一致。理想情况下，当你选择 IDE 软件的工具 > 端口菜单时，会看到 Uno 电路板在列表中，旁边有对勾标记，一切正常。倘若如此，请跳过之后的检修阶段，直接前往下面的老式 Arduino 闪烁测试（见老式 Arduino 闪烁测试一节）。

Windows 故障检修

有两种情况可能会影响端口分配。

- 在 Arduino IDE 软件的端口子菜单下，你可能会见到 Uno 电路在列表中，但是没有勾选，而另一个端口可能勾选。试着给正确的端口做对勾标记。如果 IDE 软件不认可你正在使用的 Uno 电路板，系统会弹出警示框。忽略警示框，点击“不再提示”，然后前往老式 Arduino 闪烁测试（参考老式 Arduino 闪烁测试一节）。
- 你在列表中可能见不到 Arduino Uno 的名称。若遇到这种情况，请记录列出的 COM 端口，然后关闭 IDE 菜单，拔下 Uno 电路板，等五秒钟后，再次打开 IDE 端口子菜单，观察哪个 COM 端口消失了。关闭子菜单，重新插入电路板，再打开子菜单，点击重新出现的端口，做对勾标记。然后前往老式 Arduino 闪烁测试（见老式 Arduino 闪烁测试一节）。

Windows 允许你核实端口设置。点击“开始”菜单，选择“帮助和支持（Help and Support）”服务。在打开的窗口中，输入关键词“设备管理器（Device Manager）”，搜索结果的第一条应该就是你要找的，点击打开。如果你使用的是 Windows XP 系统，设备管理器会显示端口列表。在较新的 Windows 系统中，你需要在设备管理器中选择查看 > 显示隐藏设备，以显示端口列表。

你应该在列表中看见 Arduino Uno 电路板。如果它旁边有一个黄色圆圈或叹号，请右击查看存在的故障。

如果 Windows 报告显示找不到电路板的设备驱动程序，就让系统在包含安装程序抽取的所有 Arduino 文件的文件夹中查找。

Arduino Uno 电路板和 Windows 端口的常见问题之一是，当有九个以上的端口分配时，IDE 软件容易混淆。这个问题不常见，但是如果你遇到了这个问题，可以尝试取消分配一些端口，或者手工分配具有单个数字编号的未使用端口。

如果仍存在问题，请参考下面的如果所有方法都失败了一节。

Mac 系统安装

IDE 安装程序下载完成后，找到计算机生成的图标，双击图标，就会看到包含 Arduino IDE 软件的磁盘镜像。你可以将它拖拽进入应用文件夹中。

现在用 USB 连接线将 Arduino 电路板接入计算机。

> 只要 Arduino 电路板与计算机通过 USB 端口连接，你就不需要使用电路板上的圆形电源插头。电路板通过 USB 连接线接收电能。

观察电路板，等待它被计算机识别。你会看见绿色的 LED 稳定发光，黄色的 LED 闪烁，电路板上附近标为 TX 和 RX 的 LED 短暂闪烁。它们显示数据正在进行传输和接收。

如果弹出窗口，显示检测到了“新网络接口”，则点击网络设置，应用该接口。如果 Uno 电路板被描述为“未配置”也没有关系，关闭窗口。

双击你拖拽入应用文件夹中的 Arduino IDE 软件图标。你需要选择与 Uno 电路板通信的正确端口。在 IDE 软件的“工具”菜单中，点击“串行端口”选项，选择列表中出现的 /dev/cu.usbmodemfa141（或名称类似的端口）。

若一切正常，如文中所述，就可以继续进行老式 Arduino 闪烁测试了（见老式 Arduino 闪烁测试一节）。

如果所有方法都失败了

本书要过一段时间才能出版，至少我希望如此！而软件的更新速度却很快。当你读到这本书时，我为 Arduino IDE 软件写的安装指南可能就已经过时了。

我将在本书每次印刷和每版新电子书发行时更新指南，使其尽可能准确。但是你当然也可能读到较老的版本。

怎么办呢？最好的方法就是登陆 Arduino 或 Sparkfun 的网站，按照上面给出的安装流程操作。相比书籍，网站更新起来更容易，更新速度也更快。

老式 Arduino 闪烁测试

假定你已经打开了 IDE 软件，它的主窗口应当如图 5-83 的截图所示，但是之后的版本会有所变动。

让电路板执行任务之前，你需要检查 IDE 软件是否已经正确识别出与计算机相连的电路板版本。

在 IDE 软件窗口中，下拉“工具”菜单，打开“电路板”（Boards）子菜单，确定 Arduino Uno 电路板的名称旁边有一个圆点，如图 5-84 所示。如果没有圆点，就点击该选项，选择它。

现在你已经准备好对 Arduino 发出指令了。在 IDE 主窗口工作区的顶端，你会见到“sketch”（略图）一词，后面有今天的日期和字母“a”。这个“sketch”是什么？是你要画的一幅图吗？

不是的。在 Arduino 的世界中，“sketch”和“program”（程序）的意义相同。或许这是因为开发者不想让人们被“用计算机编程”的想法吓到。史蒂夫·乔布斯在世时，也同样考虑到，如果称手持设备的程序为“app”（应用），那么使用者应该会更舒适。乔布斯的想法大约是正确的，但是我不认为电子爱好者也这么容易受到惊吓。我觉得他们实际上**想要**用计算机编程。否则，你为什么阅读这本书呢？

对于 Arduino 而言，“sketch”和“program”是一样的。此处我将继续使用“程序”一词，因为这就是它的本来面目。当你在网上阅读源材料时，人们使用“program”一词的频率和“sketch”的频率至少是相等的。

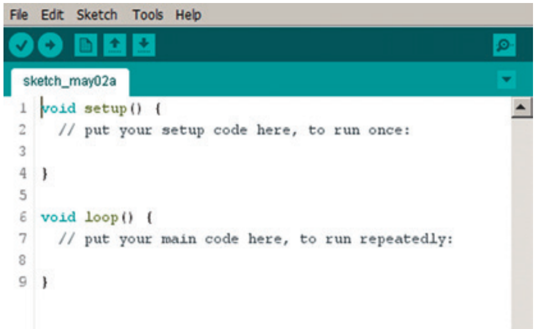


图 5-83　Arduino IDE 软件启动时的默认窗口

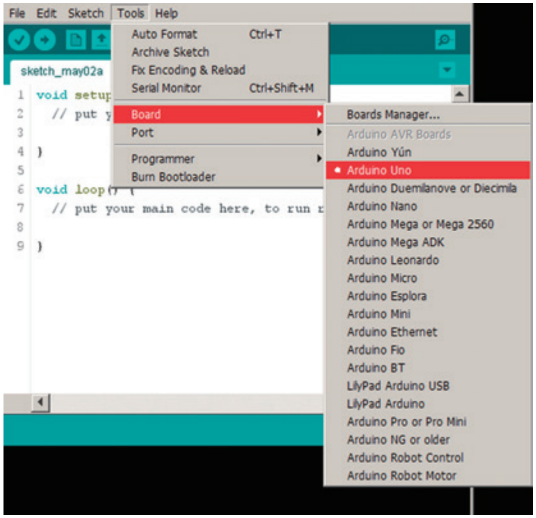


图 5-84　使用 Arduino Uno 电路板时，在“电路板管理”子菜单下它的名称旁应该有一个圆点

现在我需要说明我们要遵循的步骤。首先，在 IDE 窗口中**编写程序**。然后选择菜单选项，进行**编译**，将程序转换成微控制器能够理解的指令。然后将程序**上传**至 Arduino 电路板，电路板自动**运行程序**。

我计算机上的 IDE 窗口包含一些默认指令，如图 5-83 所示。未来版本的 IDE 可能有所不同，但原则是相同的。你会看到由双斜线开头的一些语句，例如：

```
//put your setup code here, to run once.
```

这是**注释行**，用于协助用户操作，起说明作用。

当你写的程序被编译以供微控制器使用时，编译器将忽略所有以 // 开头的语句。

下一行为如下：

```
void setup( ) {
```

这是一行程序代码，供编译器和微控制器理解。但是你也需要理解该语句的意思，因为每个 Arduino 程序的开头都有设置语句。我希望你将来能写出自己的程序。

void 一词告诉编译器：本步骤不会产生任何数据结果或输出。

setup() 表示后面的步骤只有在程序起始时才被执行一次。

请注意在 setup() 后有一个 { 符号。

❒ C 语言中的每个完整函数都应该包含 { 符号和 } 符号。

因为 { 符号后面总是要跟随 } 符号，所以在屏幕上某处一定有一个 } 符号。是的，它就在几行之下。{ 和 } 两个符号中间没有内容，因此本步骤中没有指令。这是因为你要编写指令。

❒ 如果 { 和 } 位于不同的行，没有关系。Arduino 编译器会忽略所有比单词之间单个空格更大的换行符和空格。

❒ { 和 } 叫作**大括号**。

现在是时候在“put your setup code here.”下面的空行上输入一些内容了。试一试这条语句：

```
pinMode(13, OUTPUT);
```

一定要正确输入，编译器不能宽容拼写错误。而且，因为 C 语言**对大小写敏感**，所以你必须区分大小写字母。pinMode 必须写成 pinMode，而非 pinmode 或 Pinmode。OUTPUT 必须写成 OUTPUT，而非 output 或 Output。

pinMode 是对 Uno 电路板的指令，告诉它如何使用其中一个引脚。该引脚可以用作数据输入引脚，也可以用作数据输出引脚。13 是引脚编号，如果你检查一下电路板，就会发现有一个小连接器的编号为 13，在黄色的 LED 旁边。13 是我任意选择的。

分号标记了语句的结束。

每条语句末尾必须加上分号。不要忘记！

继续向下，看到另一条语句，下面有空行：

```
//put your main code here, to run repeatedly.
```

从双斜线可以看出，这又是一条注释语句。编译器会忽略它。在下面认真地输入这些语句：

```
void loop( ) {
digitalWrite(13, HIGH);
delay(100);
digitalWrite(13,LOW);
delay(100);
}
```

如果熟悉 Arduino，你现在就会自言自语：“啊，这是老式的闪烁测试！”确实如此，而这也是我将本章节命名为“老式 Arduino 闪烁测试”的原因。几乎所有人都用此项目预测试电路板（但是我改变了延时的长度，其原因将很快阐明）。请你先迁就一下，把程序输入 IDE 中。很快我就会讲到一些更复杂的项目。

而且，你还需要粗略了解一些语句的实际意义：

`void` 的意义与上文相同。

`loop()` 是命令电路板反复执行某操作的语句。电路板要执行什么操作呢？它必须遵循两个大括号之间的那些语句的指示。

`digitalWrite` 是从某引脚输出的指令。哪个引脚？我指定了 13 号引脚，因为它的模式已经在前面界定过了。

只有指定了数字引脚的模式以后，才能使用该引脚。

引脚要执行什么任务？变为高输出状态。

不要忽略语句末尾的分号。

`delay` 命令电路板等待一段时间。多长时间？ 100 指 100 毫秒。每秒钟有 1000 毫秒，因此电路板要等待 0.1 秒。在这一段时间内，13 号引脚将保持高电平。

你应该可以明白后两条语句的意思了。

很快你就可以使程序运行了。但是首先，请将一个 LED 的引脚插入 13 号连接器和它旁边标记为 GND 的连接器之间。

- ❒ 确保 LED 的短引脚插入 GND 连接器中。
- ❒ LED 不需要串联电阻器，因为电阻器内置在 13 号引脚中。

在电路板接通时，我电路板上黄色的 LED 已经默认开始闪烁。我刚连入的 LED 也开始闪烁，因为电路板上安装的黄色表面安装 LED 与 13 号引脚并联。

在老版本的电路板上，表面安装 LED 不会在电路板接通的时刻立即开始闪烁。在未来的版本中，Arduino 可能会禁用“默认闪烁”的效果。无论如何都没有关系，因为程序要改变闪烁的速率。

检查和编译

下一步，你必须检查自己是否有任何拼写错误。下拉“程序”菜单，选择检查 / 编译（Verify/Compile），如图 5-85 所示。IDE 检查你的代码，若发现错误，就产生错误报告。

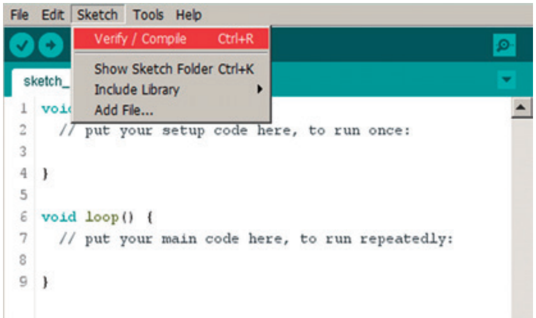


图 5-85　在将程序传送给电路板之前，选择检查 / 编译选项

你可以测试一下。在程序中，将 `pinMode` 改为 `piMode`，然后点击检查 / 编译，观察会有什么情况发生。

你会在 IDE 窗口底部的黑色区域收到一条错误信息。用鼠标拖拽黑色区域的顶端，可以将区域扩展，这样你就可以一次看到两条以上的信息，而不用滚动鼠标。我得到的错误信息为："piMode was not declared in this scope."（piMode 未在域中声明。）

C 语言中有保留字和定义的函数，它们具有特别的意义。你已经用到了其中几个，例如 `digitalWrite` 和 `delay`。

但是 `piMode` 既不是保留字也不是定义的函数，因此编译器认为你没有对它作出定义，即没有说明它的用法。

请修改程序代码，直至编译 / 检查不再出现任何错误为止。

上传和运行

下拉"文件"（File）菜单，选择"上传"（Upload）。我自己感觉这个过程应该是 Arduino 电路板从我的大计算机里下载文件，但是每个人都称之为上传，所以我猜测这是它的本来真相。

如果上传成功，你会在黑色的错误窗口上方见到"完成上传"（Done Uploading）的信息。

如果上传不成功，上传进程就不会终止，这可不太好。这意味着通信仍存在问题，也许是因为 COM 端口分配并不匹配。请回到上面，根据你所用计算机的排查故障，但是请首先保存你的程序。下拉"文件"菜单，选择"保存"（Save），为程序命名。修复 COM 端口的问题后，如果必要，你可以重新加载程序，再次尝试。

若一切正常，电路板上的黄色 LED 和你添加的 LED 都会快速闪烁：亮 0.1 秒，然后暗 0.1 秒，遵循你的程序指令。

经过了这么多步骤，你可能觉得这点成就不算什么，但是我们总要从某个地方开始，而闪烁的 LED 通常是微控制器编程的起始实验。在下一个实验中，你将编写一个新程序，让它做更有意义的事情。

下面，我总结了你目前所学的内容，以及给 Arduino 电路板编程的操作方法。

- ❒ 打开新的程序（或 Arduino 中的"sketch"）。
- ❒ 若有必要，从"文件"菜单中选取"新文件"（New）。
- ❒ 每个程序的开头必须为 `setup` 函数，它只运行一次。
- ❒ 必须使用 `pinMode` 命令声明数字引脚的编号和模式，之后才可以对该引脚进行操作。
- ❒ 引脚的模式可以为 `INPUT` 或 `OUTPUT`。
- ❒ 有些引脚编码无效。请查看你的 Uno 电路板所使用的编码系统。
- ❒ 必须用一对大括号将程序中的每个函数或代码块囊括起来，但是两个括号可以不在同一行。

- ❒ 编译器忽略换行符和多余的空格。
- ❒ 函数或代码块中的每条语句必须以分号结尾。
- ❒ 每个 Arduino 程序必须包含一个 `loop` 函数（在 `setup` 函数之后），它将重复运行。
- ❒ `digitalWrite` 指令要设定为输出的引脚取高电平（HIGH）状态还是低电平（LOW）状态。
- ❒ `delay` 使电路板等待一段指定的毫秒数（毫秒为千分之一秒）后开始工作。
- ❒ 命令后面圆括号中的数字是**参量**，告诉电路板如何执行该命令。
- ❒ 在“程序”菜单中选取检查 / 编译选项，在上传程序之前对其进行检查。
- ❒ 必须改正检查 / 编译操作中发现的任何错误。
- ❒ 保留字是 Arduino 电路板能理解的命令词汇，必须拼写正确。要区分大写字母与小写字母。
- ❒ 上传程序后，它会自动运行，而且会一直运行，直到你断开电源或上传一段新的程序为止。
- ❒ 在 Uno 电路板的 USB 连接器旁边有一个重置按钮（触摸开关）。按下此按钮，电路板会重新启动程序，所有的值都重置。

注意：编码丢失

如果你修改程序，并将它上传至微控制器，则新程序会**覆写**在旧程序上面，也就是说，旧程序被擦除了。如果你没有把旧程序存储为另外的文件名，它可能会永远丢失。在上传修改过的程序时，一定要非常小心。在计算机上按照新文件名存储每个版本的程序是明智的预防措施。

在程序上传到微控制器中以后，就没有办法把它们再读出来了。

编程要注意细节

不知你注意到了没有，本实验总结的要点比任何一个使用独立元件的实验的都长。编程包括很多细节问题，你需要保证所有细节都完全正确。我个人比较喜欢编程，因为一旦程序调试正确，它就永远都是正确的，运行结果也永远相同。程序不会磨损，保存在合适的介质中，可以永久保存。我在 20 世纪 80 年代写的软件在 30 年后仍可在台式计算机的 DOS 窗口下运行。

有些人不喜欢细致的工作，或是容易打错字，或是不喜欢计算机语言不灵活的命令下达方式（例如，**总是**要求程序以 `Setup` 函数起始，即使没有设置）。不同的人喜欢电子学的不同方面，这才是它应有的样子。如果每个人都想编程，没有人想接触硬件，我们就没有计算机可用了。具体哪种活动适合你，还要由你自己决定。

我个人喜欢接下来进行另一项实验，以更加有趣的方式利用 Arduino 电路板。我将向你展示某些情况下，微控制器如何比独立元件更容易地实现电路功能。

但是在这项实验结束之前，你可能想知道如果断开电路板与计算机的连接，会发生什么。

- ❒ Arduino 电路板需要电能使程序**运行**。

- ❐ Arduino 电路板不需要电能储存程序。程序自动储存在微控制器中，就像数据存在闪存盘中一样。
- ❐ 如果你想在电路板未与计算机连接时运行程序，就需要向电路板上 USB 插口旁边的圆形黑色插孔供电。
- ❐ 电源电压可以为 7 V~12 V 直流，它不需调整，因为 Arduino 电路板包含调节器，可以将板上输入电压变为 5 V 直流。（有些 Arduino 电路板使用 3.3 V 直流电压，但不是 Uno 类型。）
- ❐ 电源插头直径 2.1 mm，中心引脚为高电压。你可以购买输出导线上有这种插头的 9 V 交流-直流适配器。
- ❐ 若在连接 USB 时同时用外部电源供电，Arduino 自动使用外部电源。
- ❐ 你可以随时切断电路板与串行连接线的连接，而不必用到某些 Windows 系统中的“安全移除硬件”选项。

背景知识：可编程芯片的起源和选择方案

在工厂和实验室中，很多操作流程是重复性的。流量传感器可能需要控制加热元件，运动传感器可能需要调节发动机的速度。微控制器非常适合这种例行性任务。

通用仪器公司于 1976 年推出了一系列早期的微控制器，称之为 PIC，即 Programmable Intelligent Computer（可编程智能计算机）或 Programmable Interface Controller（可编程接口控制器），就看你相信哪个历史渊源了。通用仪器公司将 PIC 品牌卖给了微芯科技公司，后者如今是 PIC 的生产商。

Arduino 使用 Atmel 微控制器，但 PIC 仍是一种选择。它也被一家名为革命教育有限责任公司（Revolution Education Ltd.）的英国企业许可用作兴趣教育。他们称自己的芯片系列为 PICAXE，没有显而易见的原因，肯定是因为他们觉得这个名字听起来很酷。（我不确定他们是否真的这样想。）

PICAXE 芯片有自己的 IDE 软件，使用另一种计算机语言，叫作 BASIC。这种语言某些方面比 C 语言更简单。另一种微控制器 BASIC Stamp 也使用 BASIC 语言，它有附加的更为强大的命令。

如果你在维基百科上搜索 PICAXE，就会阅读到各种特性的详细介绍。实际上，我认为维基百科提供的概述比 PICAXE 网站上的内容更为清晰。

与 Arduino 不同，你不需购买特殊的电路板给 PICAXE 芯片编程。除了免费下载合适的 IDE 软件之外，你只需要一根定制的 USB 连接线。

本书的第 1 版包含了一些 PICAXE 产品的介绍信息。如果你感兴趣，可以找到二手书来阅读。

基础知识：优点和缺点

你已经学习了一些基础知识。现在，我需要讨论一些问题，它们可能会再项目芯片的选择上影响你的决定。

寿命

生产商保证 ATmega328 芯片的闪存可进行 10 000 次读写操作，并能自动锁存损坏的存储单元。这似乎已经足够了，我们可能也希望微控制器能够永久使用。但是，我们还不知道它的寿命是否真的能像老式的逻辑芯片一样长，某些逻辑芯片在生产 40 年后仍能使用。这一点是否重要呢？你需要自己做出决定。

报废

微控制器作为一种技术正在迅速成熟。当我写第 1 版书的时候，Arduino 还是一种较新的技术，它的未来还不确定。现在，它主导了电子爱好者的领域，但是再过五年情况又会如何呢？没有人知道。树莓派（Raspberry Pi）这样的产品，一片芯片上就有一台完整的计算机。没有人能预测它或者类似的产品是否会代替 Arduino。

即使人们仍然选择 Arduino 作为微控制器，我们也已经见到了新版本的硬件，以及在为芯片编程时必须用到的 IDE 软件的升级版。无论如何，你都需要了解该领域的进展，甚至还可能必须弃用一个品牌的微控制器，换用另一个品牌。

相比而言，大多数情况下，通孔类型的独立元件已经达到了发展周期的末端。也有一些较新的发明，例如旋转编码器或小型点矩阵 LED 和 LCD 显示器。但是，大多数新产品都被设计用于与微控制器配合使用。在晶体管、二极管、电容器、逻辑芯片和单芯片放大器的简单世界中，你今天学到的知识在十年后也应该有效。

混合电路

最后，也是最重要的一点，微控制器不能单独使用。它们总是要求与其他元件配合使用，即使只是一个开关、电阻器或 LED，而且其他元件必须与微控制器的输入和输出良好兼容。

因此，为了实际应用微控制器，你仍然需要对电子学有整体的了解。你需要理解电压、电流、电阻、电容和电感等电学基本概念，也应该了解晶体管、二极管、字母-数字显示器、布尔逻辑等本书所讲的内容。如果你想搭建原型电路，还需要了解如何使用面包板或制作焊接点。

记住以上要点，我就可以总结独立元件和微控制器的利弊了。

独立元件：优点

简单。

结果立即可得。

不需编程语言。

价格便宜，用于小型电路。

相关知识长期有效。

更适合模拟应用，例如音频电路。

使用微控制器时仍必须使用。

独立元件：缺点

一次只能实现一个功能。

涉及数字逻辑的应用，电路设计比较困难。

不易扩展，大型电路较难搭建。

电路难以修改，甚至不可能修改。

电路中的元件越多，电路所需的功率就越大。

微控制器：优点

用途非常广泛，能实现很多功能。

添加功能或修改电路比较容易（只需改写程序代码）。

网上有庞大的应用库免费供应。

是实现复杂逻辑电路等应用的理想工具。

微控制器：缺点

对于小电路而言比较昂贵。

需要较高水平的编程技能。

开发步骤比较耗时（除了检修电路硬件之外，还要写代码、安装代码、测试、修改和除错、重新安装）。

相关技术发展迅速，要持续学习。

每种微控制器都有各自的特点和缺陷，需要学习和记忆。

复杂度越高意味着可能出错的地方越多。

需要台式计算机或笔记本电脑，以及程序的数据存储器。

数据可能意外丢失。

需要经过调节的电源（通常为 5 V 直流或 3.3 V 直流），例如逻辑芯片。

输出局限在每引脚 40 mA 或更低，不能像 555 定时器一样驱动继电器或扬声器（如果需要提供更多电能，必须单独购买驱动器芯片）。

总结

现在我准备好回答这个问题了："我应该使用微控制器还是独立元件呢？"

我的答案是两者都需要。这就是我在主要介绍独立元件的一本书中介绍微控制器的原因。

在下一个实验中，我将展示传感器和微控制器是如何合作的。

实验 33：检测真实的世界

开关的状态非"闭合"即"断开"，但大多数从真实世界中输入的值都会在两个极端之间变化。例如，热敏电阻是一种传感器，它的阻值根据在很宽的范围内随温度变化。

如果微控制器能处理这样的输入，它就会非常有用。例如，它能接收热敏电阻的输入，然后可以作为恒温器使用，如果温度下降到最低限度以下，就打开加热器，而当房间足够温暖时，就关闭加热器。

Arduino Uno 电路板使用的 ATmega328 芯片可以完成这个任务，因为它有六根引脚归类为"模拟输入"，也就是说它们不会只在数字基础上将输入评估为"逻辑高电平"或"逻辑低电平"。这六根引脚在内部使用模拟-数字转换器（Analog to Digital Converter，ADC）转换输入。

使用 5 V 电压的 Arduino 的模拟输入，电压范围必须为 0 V~5 V 直流。（实际上，上限可以修改，但是这样会引入一些复杂性，我将稍后讲解。）热敏电阻不会产生电压，它只会改变自己的阻值。因此，我需要想出一种方法，让阻值的改变能引起电压的改变。

一旦解决了这个问题，微控制器内部的 ADC 就能够将模拟引脚上的电压转换为 0~1023 之间的数值了。为什么取这个数值范围呢？因为这个范围可以用 10 位二进制数字表示，而且 ADC 的精度也不足以识别更大的范围和更小的间隔。

ADC 得到数值以后，程序可以将其与目标值比较，采取适当的行动——例如改变输出引脚的状态，该引脚向固态继电器提供电压，而继电器会开启房间的加热器。

图 5-86 展示了从热敏电阻到数值显示的过程。

下面的实验将向你展示具体的操作方法。

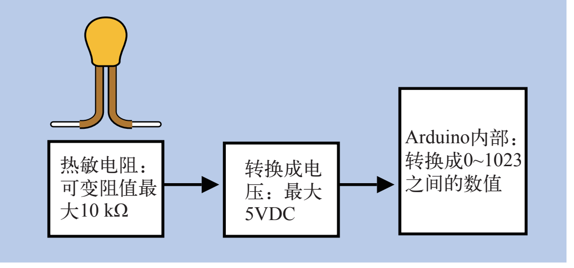


图 5-86　处理热敏电阻状态的计划简图

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表

- ❐ 热敏电阻 1 个，10 kΩ，精度 1% 或 5%（必须为 NTC 类型，即阻值随温度上升而下降；PTC 热敏电阻的性能相反）
- ❐ Arduino Uno 电路板 1 个
- ❐ 笔记本电脑或台式计算机 1 台，有可用的 USB 端口
- ❐ USB 连接线，两端分别为 A 类和 B 类连接器 1 个
- ❐ 6.8 kΩ 电阻器 1 个

使用热敏电阻

第一步是了解热敏电阻。它的引脚非常细，因为不能让引脚将热量导入或导出温度测量结点所在的尖端。引脚太细了，可能无法牢固地插在面包板上，所以我建议你用一对弹簧夹测试引线夹住它们，用夹子夹住万用表的表笔，如图 5-87 所示。

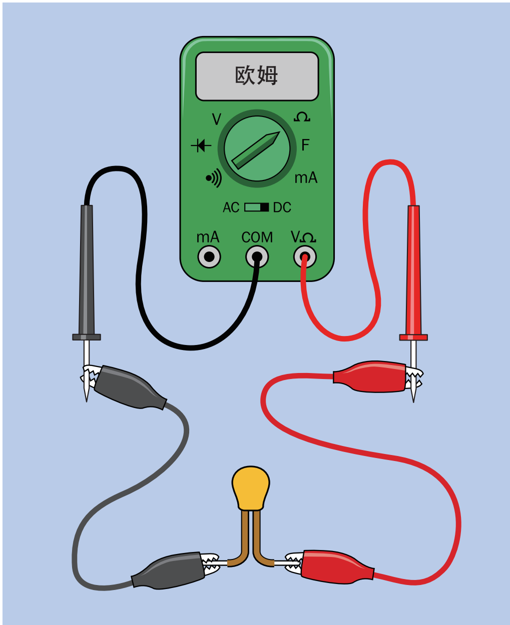


图 5-87　测试热敏电阻

我建议使用的热敏电阻阻值为 10 kΩ，这是当它完全冷却时的最大阻值。直到温度上升到约 25 摄氏度（77 华氏度）时，它的电阻才开始显著变化。在这一点之后，它的阻值开始迅速下降。

你可以用万用表测试：在室温下，热敏电阻的阻值应约为 9.5 kΩ。现在用拇指和食指捏住它，电阻吸收了你身体的热量，阻值就会下降。在人体体温（认定为 37 摄氏度或 98.6 华氏度）下，它的阻值为约 6.5 kΩ。

如何把阻值变化转换为微控制器要求的 0 V~5 V 电压呢？

首先要注意，与室温对应的最大阻值应该低于 5 V。真实世界是不可预测的，如果由于某些意外原因，电阻的温度大大超出了你的预期（比如你把烙铁放在了热敏电阻旁，或者把它放在了电子设备发热的位置上），又该如何呢？

这就是模拟–数字转换的第一个启示：检测外部世界时，要允许意外的、极端的测量值出现。

范围转换

将热敏电阻阻值转换为电压值最简单的方式是：选择一个与热敏电阻在目标温度范围内平均阻值

大致相等的电阻器。将电阻器和热敏电阻串联，制成分压器，在两端分别施加 5 V 和 0 V 直流电压，然后测量两个电阻中点的电压值，如图 5-88 所示。

通常，为了设置电路，你需要安装电压调节器来提供 5 V 直流电压。但是，Arduino 电路板有自己的电压调节器，能够方便地提供 5 V 直流输出（如图 5-79 所示）。你可以用连接线把 Arduino 电路板的输出引到面包板上，还需要从电路板引出一根接地线，同样连接到面包板上。

当我进行实验，将热敏电阻的温度从 25 摄氏度变化到 37 摄氏度时，电压表读数从 2.1 V 变化到 2.5 V。你应该自己尝试一下，与我的结果对照。

很明显，在这样的电压下微控制器并无损坏风险。但是我现在发现了另一个问题：电压变化幅度不够大，不足以达到最佳精度。

图 5-89 展示了输入电压和内部等效数字之间的关系。2.1 V~2.5 V 的范围用深蓝色的长方形表示。它会转换成约 430~512 的数值，区间范围只有 82，仅占 0~1023 总范围的一小部分。

使用这样小的电压范围就如同使用高分辨率照片中的几个像素，细节损失不可避免。如果我们能把电压范围转换为 500 个数值，而非 82 个数值，岂不是更好一些？

一种实现方法是放大电压，但是这样需要添加元件，例如运算放大器。这个设想可能实现，但是这样我们就需要用电阻器控制反馈，电路会变得很复杂。微控制器的整体思想就是使电路简化！

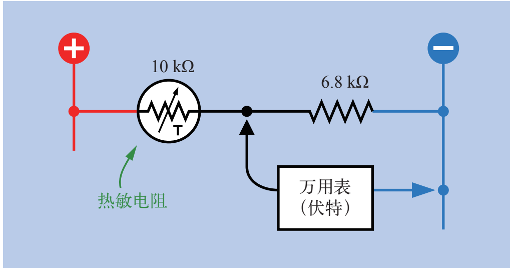


图 5-88　将热敏电阻的阻值变化转换为电压的最简电路

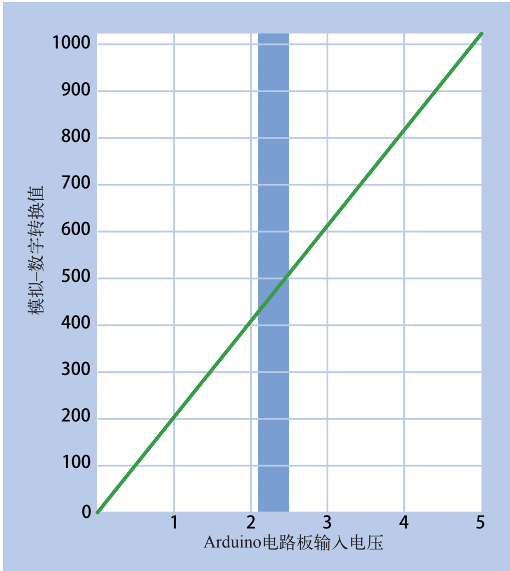


图 5-89　Arduino 电路板的输入电压与 ADC 数值的转换图。蓝色的长方形表示，当温度在 75~95 华氏度之间变化时，与 6.8 kΩ 电阻器串联的 10 kΩ 热敏电阻输出的近似电压范围

还有另一种方法：利用 Arduino 电路板的特性为电压范围设置较低的上限。但是这样需要我为其中一根引脚提供新的电压上限。为提供该电压，我将需要制造另一个分压器，然后计算出新的电压输入和 ADC 数值的转换关系。我真的想避免这些操作，至少在简单的程序运行起来之前是如此。

考虑了以上可能性之后，我决定还是使用原先的 82 个数值范围表示 75~95 华氏度。ADC 产生的每个数字步长代表约 1/4 华氏度（约为 0.139 摄氏度）。这样的设置对于体温计来说不够精确，但

对于房间温度控制已经足够。

连接电路

让我们动手实验吧。但是请稍等——我们是不是还要将独立的面包板与安装了微控制器的时髦 Uno 电路板配合使用？

计划确实如此。有三种连接电路的方法。

- 你可以购买一块**原型板**，它看起来就像 Uno 电路板顶端插在连接器上的小型面包板。我并不喜欢这种设备，因为它让我们远离了普通面包板上最终完成的电路。
- 你可以把微控制器从 Uno 电路板上拆下来，插到面包板上，然后就可以按照普通的方式连接元件与控制器的引脚了。但是这样做了，你就无法把程序上传到微控制器中，而且还需要用晶体振荡器使微控制器的运行速度和在 Arduino 电路板上一样。
- 你可以将热敏电阻和电阻器安装在普通的面包板上，然后通过跨接线把热敏电阻电路中的电压引到 Uno 电路板上，Arduino 电路板向面包板提供电源电压和接地采用的也是这种方法。这比较麻烦，但大多数人都这么做。如果你编好了程序，并已将它上传到微控制器中，就可以将芯片移动到更方便的位置上了。

图 5-90 展示了面包板电路。图 5-91 展示了实物电路图。我必须承认，这种情况下两端带插头的连接线确实比较方便，但是我仍然不能完全信任这种连接线。

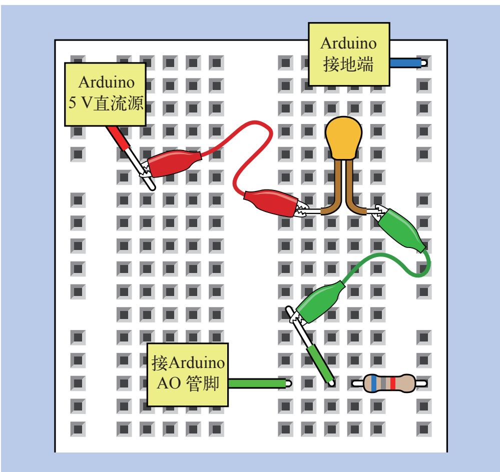


图 5-90　将热敏电阻电路连接到 Arduino 电路板上

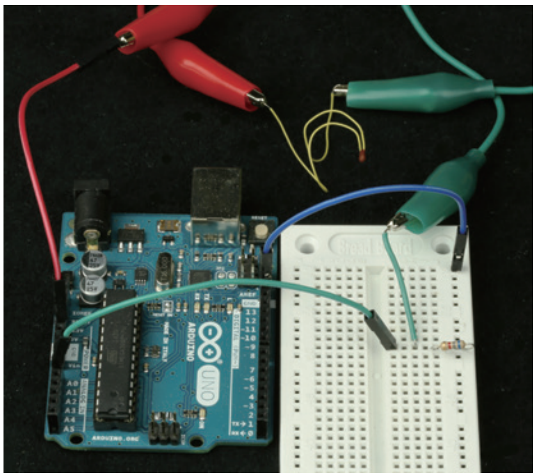


图 5-91　用跨接线将热敏电阻电路连接到 Arduino 电路板上

什么，没有输出？

现在你已经准备好将模拟输入转换为内部的数值了。但是请稍等——这里缺少了一些东西。你还没有设置输出呢！

理想情况下，Uno 电路板会附带销售小型字母数字显示器，这样你就可以把它当作真正的计算机使用了。实际上，你可以买到与 Uno 配套的显示器，但是这同样会增加电路的复杂度。和微控制器世界里的所有器件一样，显示器和电路板都不是即插即用的。微控制器需要经过编程才能向显示器输送文本。

因此，我将尽量简化电路。我要把 Uno 电路板上的黄色小 LED 用作指示器，假设指示器代表房间加热器，它在温度较低时接通，在温度较高时断开。

迟滞现象

假设我们要给温室供热，目标温度是温暖舒适的 85 华氏度（约 29 摄氏度）。假设该温度下，电阻器和热敏电阻组合提供的电压是 2.3 V，在图 5-89 中的图表上查找该电压，会发现微控制器内部的 ADC 会将该值转化为 470 左右的数值。

因此，我们将 470 设为阈值。如果数字下降到 469，就开启加热器（或者通过点亮 LED 来模拟）。如果数字上升到 471，就关闭加热器。

但是请稍等。这样做有意义吗？这意味着热敏电阻感应到很微小的温度上升，LED 也会点亮，而很微小的温度下降也会使 LED 熄灭。系统将会不停地波动。

真实的恒温器不会对开关门造成的每一点微小温度变化作出响应。电源接通时，它会一直保持工作状态，直到温度略高于目标温度为止。电源断开后，它会一直保持关闭状态，直到温度略低于目标温度为止。

这种现象叫作迟滞，我在 *Make: More Electronics* 一书中详细介绍了这种现象，以及相关的元件：比较器。

我们如何在微控制器程序中实现迟滞呢？我们需要比 469~471 更宽阔的取值范围。程序可以表达这样的意思：“如果 LED 点亮，则使它保持发光状态，直到温度值超过 490，然后再熄灭 LED。”以及“如果 LED 熄灭，则使它保持熄灭状态，直到温度值低于 460 为止，再点亮 LED。”

我们能实现这个功能吗？是的，很容易。图 5-92 列出的程序使用了该逻辑。程序截图来自 Arduino IDE 软件，所以我有充足的理由相信它可以工作。

程序中引入了一些新概念，但是请你先把它输入 IDE 软件中。注释行不需输入，我添加它们只是为了解释说明。你可以输入图 5-93 中删减版的程序，我省略了注释行。

```
// Heater Control Simulation
// by Charles Platt

int digitemp = 0;
// digitemp is a variable to store
// a digitized temperature value.

int ledstate = 0;
// Will be 0 if LED is currrently off.
// Will be 1 if LED is currently on.

void setup()
{
    pinMode (13, OUTPUT);
    // Onboard LED shows the output.

    // (No need to set the analog pin
    // which is input by default.)
}

void loop()
{
    digitemp = analogRead (0);
    // Thermistor is on analog input A0.

    if (ledstate == 1 && digitemp > 490)
        {
        ledstate = 0;
        digitalWrite (13, LOW);
        }

    if (ledstate == 0 && digitemp < 460)
        {
        ledstate = 1;
        digitalWrite (13, HIGH);
        }

    delay (100);
}
```

图 5-92　控制假想的加热设备的程序

```
int digitemp = 0;
int ledstate = 0;

void setup()
{
    pinMode (13, OUTPUT);
}

void loop()
{
    digitemp = analogRead (0);
    if (ledstate == 1 && digitemp > 490)
        {
        ledstate = 0;
        digitalWrite (13, LOW);
        }
    if (ledstate == 0 && digitemp < 460)
        {
        ledstate = 1;
        digitalWrite (13, HIGH);
        }
    delay (100);
}
```

图 5-93　同样的程序，省略了注释行

检查 / 编译程序，修改所有的拼写错误（可能某处会丢失分号，这是最常见的错误）。

插入 Arduino 电路板，上传程序，如果热敏电阻的温度低于 85 华氏度，黄色 LED 就会点亮。

用拇指和食指捏住热敏电阻，让热敏电阻以为房间温度上升了。几秒钟后，LED 熄灭。现在松开热敏电阻，它逐渐冷却，但是 LED 还要继续亮一会儿，因为系统的迟滞效应要求温度降到足够低。最终，LED 再次亮起。成功了！

但是程序是如何工作的呢？

逐行讲解

程序引入了变量的概念。变量是微控制器存储器内的小空间，其中可以存储数据。你可以将它想象为一个“存储盒”，盒子的外面有标签，写明变量的名称。盒子里面是数值。

`int digitemp=0;` 意为我创建了一个名为 `digitemp` 的变量。它是一个整数，赋值为零。

`int  ledstate=0;` 意为我创建了另一个整数变量，用于跟踪电路板上 LED 的亮灭情况。我很难让微控制器去查看 LED 并向我报告它的状态，所以我需要自己跟踪它。

程序的 setup 告知微控制器把 13 号引脚作为输出。我不需要让它将引脚 A0 作为输入，因为模拟引脚是默认的输入。

现在是程序的核心——循环部分。首先，我使用 analogRead 命令告诉微控制器读入模拟端口的状态。哪个端口？我指定了 0，即模拟端口 A0。该端口是面包板插入的地方。

ADC 读取端口信息后，我应该怎样处理信息呢？只有一个合适的办法：专门创建名为 digitemp 的变量，把信息放置其中。

既然 digitemp 已经有了数值，我就可以检测它了。首先，我要说明，如果加热器开启（LED 点亮）且温度值大于 490，就该关闭加热器。“如果”部分的语句写成：

```
if (ledstate==1 &amp;&amp; digitemp &gt; 490)
```

双等号 == 意为：“进行比较，看两个值是否相等。”单等号意为：“将此值赋予变量”，两个操作不同。

&& 符号表示“逻辑与”。是的，我们在此应用布尔逻辑，就如同使用逻辑与门电路一样。但是这次不用给芯片接线了，只要输入一行代码就可以。

> 符号表示“大于”。

if 测试用圆括号括起来。如果圆括号内的语句为真，则微控制器执行大括号内部该语句下面的程序。该步骤中，ledstate = 0 记录 LED 将被熄灭的事实。digitalWrite (13, LOW); 将引脚置低电平。

第二个 if 测试与之类似，不同之处是只有当 LED 熄灭，而温度已经大幅下降时，电路才会启动，此时点亮 LED。

最后，程序有 0.1 秒的延迟，因为我们并不需要更为频繁地测量温度。

以上就是所有讲解内容。

其他细节

我加入了一些语法元素，例如 if 测试、双等号，以及 && 逻辑算子，而没有给出 C 语言完整的语法列表。你可以在网上找到语法列表，此处就不浪费篇幅了。

以下是编程的注意事项。

- 各行语句缩进，以使逻辑结构清晰。编译器会忽略多余的空格，所以你想加多少空格都可以。
- IDE 用颜色标记帮你检查是否出现了拼写错误。
- 在为变量命名时，可以使用任何字母、数字和下划线，只要它们的组合不与 C 语言中任何有特殊意义的词汇重复即可。例如，你不能把变量命名为 void。
- 有些人喜欢把变量名开头写成大写字母，而有些人不喜欢。你可以自行选择。
- 每个变量都应该在程序开头处进行声明，利于编译器编译。

- ❒ 整数（用 `int` 声明）取值范围可以在−32 768 至 +32 767 之间。微控制器的 C 语言允许其他类型的变量取值范围更大，或者取小数。但是在实验 34 之前，我都不会用到更大的数值。

若想获取编程语言入门指南，请访问 Arduino 网站主页，点击 Learning（学习）标签，从下拉菜单中选择 Reference（参考）。你也可以从 Arduino IDE 软件的“帮助”菜单中选择 Reference 子菜单。

功能增强

本实验完成了我计划的任务，但是它的功能十分有限。最大的限制是：实验使用特定的数值限定最低和最高温度值。这就像把恒温器粘到固定的位置上，永远不能调节。应当如何修改程序，使用户能够调节控制加热器开关的阈值温度呢？

我认为解决方法是添加电位器。电位器轨道的两端将分别连接 5 V 和 0 V 电压，而滑动片将连接到微控制器的另外一个模拟输入上。这样，电位器就可作为分压器，提供 0 V~5 V 的直流电压。

然后我会在循环中添加一个步骤，微控制器检查电位器的取值，并将其数字化。

得到的结果取值范围是 0~1023。我需要将该结果转换成与 `digitemp` 变量可能取值范围兼容的数值，然后将新的数值存储在新的变量中，可以命名为 `usertemp`。之后，我要检查热敏电阻检测到的实际房间温度是否明显超出或低于 `usertemp`。

请注意，我略过了一个小细节：如何将电位器输入转换到 `usertemp` 适合的范围。好，我现在就来处理这个问题。

如果热敏电阻的可能取值范围是前面所估计的 430~512，可以将该范围表示为中间值 471±41。电位器的中间值为 512，总范围为 512±512。因此：

```
usertemp = 471 + ((potentiometer-512)*0.08)
```

其中，`potentiometer` 是电位器输入的值，而星号在 C 语言中用作乘法符号，这样就十分接近了。

编程确实会包含数学计算，这是迟早的事，没有办法躲避。但是用到的数学很少会超出高中范围。

在功能增强的程序中，我仍然要注意迟滞问题。第一个 `if` 语句需要修改为：

```
if (ledstate==1 && digitemp > (usertemp + 10))
```

然后熄灭 LED。但是：

```
if (ledstate==1 && digitemp < (usertemp + 10))
```

那么点亮 LED。这样就能有 ±10 的温度迟滞范围（用 ADC 数值表示）。

描述了改进方案以后，你可以考虑自己完成这个项目了。只是一定要记住，一定要先声明每个新变量，然后才能在程序语句中使用。

实验 34：更好的骰子

在最后一个实验中，我将再访实验 24，这个实验使用逻辑芯片产生骰子点数图案。现在，我们可以使用微控制器程序中的 `if` 语句与逻辑算子产生点数图案，而不需使用逻辑芯片了。我们可以用几行代码代替几个硬件，也可以用一个微控制器代替一个 555 定时器、一个计数器和三个逻辑芯片。本实验是恰当运用微控制器的优秀实例。（当然也仍需用到一些 LED 和串联电阻器。）

需要的工具

- ❒ 面包板、连接线、剪线钳、剥线钳、测试引线、万用表
- ❒ 通用 LED 7 个
- ❒ 330 Ω 串联电阻器 7 个
- ❒ Arduino Uno 电路板 1 块
- ❒ 笔记本电脑或台式计算机 1 台，有可用的 USB 端口
- ❒ USB 连接线 1 根，两端有 A 类和 B 类连接器

“发现学习法”的局限性

在了解电子元件时，“发现学习法”的效果很好。你可以把元件安装在面包板上，接通电源，观察发生的现象。甚至在你设计电路时，也可以进行反复尝试，不断修改。

编程则大不相同。你需要遵守规范，逻辑清楚，否则就容易写出错误百出的代码，无法可靠运行。而且，你还要提前做好计划，否则就会浪费大量的时间重复以前的工作，甚至完全抛弃自己的心血。

我不喜欢做计划，但我更讨厌浪费时间，因此我选择做计划。在最后这个实验中，我将描述计划的步骤。很遗憾，把几个部件摆放在一起观察现象并不能给你带来直接的快乐，但是如果我不讲解软件开发的步骤，就会造成编程比实际容易的误导性印象。

随机性

第一个问题显然是：“我究竟想让这个程序做什么？”这个问题很有必要提，如果没有明确目标，微控制器就无法帮助你实现目标。我在实验 15 中描述的为防入侵报警器列出“愿望清单”的步骤与之类似，但是微控制器需要更多的细节。

基本要求很简单。我希望程序能选择一个随机数，用代表骰子点数图案的 LED 将它显示出来。

因为随机数的选择对本程序至关重要，所以你需要全面了解随机性的相关知识。请登录 Arduino 网站，上面有语言参考版面。它没有我希望的那么全面，但也可以作为好的起步点。

打开 Arduino 的首页，点击“学习”标签，选择“参考”（Reference），就能找到一个命名为“随机数”（Random Numbers）的版面。点击它，会发现有一个函数专门为 Arduino 创建，名为 `random()`。

这不太令人惊讶，因为几乎所有的高级计算机语言都内置某种随机函数，通过伪随机数方法产生一串普通人无法预测的数字序列，该序列经过很久才会重复。唯一的问题是：因为序列是通过数学方法创建的，所以每次你运行程序时，它都会从相同的位置开始。

如果你想让序列从不同的位置开始，应该怎么办呢？这里有另一个 Arduino 函数：`randomSeed()`，它通过检查微控制器未连接的引脚的状态使数字发生器初始化。如前所述，悬空的逻辑引脚会受到周围一切电磁辐射的影响，你永远无法知道它的状态究竟如何。因此，`randomSeed()` 是真实随机的，听上去很好——但是我们要记住，不能用未连接的悬空引脚用作其他事情。

把随机数发生器初始化的问题暂且搁置一旁，假设我使用 Arduino 的 `random()` 函数为骰子程序的输出选择一个数值，程序实际上应该怎么运行呢？

我认为用户会按下按钮，同时显示出随机的骰子点数图案。很好！如果你需要再“掷”一次骰子，可以再按一下按钮，显示出另一个随机的点数图案。

这听起来十分方便——但是看起来可能不太有趣，也可能不太可信。人们可能会怀疑数字是否确实为随机数。我认为，问题就出在用户失去了程序的控制权。

回到本实验的硬件版本，我喜欢让显示器迅速显示出模糊的图案，也喜欢用户按下按钮任意停止序列的方式。

或许程序应该模拟这一效果而非使用 `random()` 函数。它可以非常迅速地反复从 1 计到 6，就像本实验硬件版本中的计数器芯片一样。

但是这样做也会让我发愁。当程序从 1 计到 6，然后重复时，我认为微控制器会额外多花几微秒的时间回到循环的开始处。因此，数字 6 显示的时间总要比其他数字略长。

或许我能把这两个概念融合在一起。我可以使用随机数发生器产生一系列数字，让它们以非常快的速度显示，直至用户按下按钮，在某个任意时刻停止。

我喜欢这个计划。但是之后怎么办呢？再装一个按钮重新启动数字显示？不，并没有这个必要，同一个按钮就能完成任务：按下按钮停止电路，再按下按钮重新启动。

现在，关于程序要执行的任务，我已经比较清楚了。这有助于我采取下一个步骤，编写出微控制器能够操作的程序。

伪代码

我喜欢写**伪代码**，它是一系列英语语句，很容易转换为计算机语言。下面是我为骰子项目制定的伪代码编写计划。请注意，指令的执行速度非常快，所以显示的数字比较模糊。

主循环如下。

- 第 1 步：选择一个随机数。
- 第 2 步：将随机数转换为骰子点数图案，并点亮对应的 LED。
- 第 3 步：检测是否按下了按钮。
- 第 4 步：如果未按下按钮，回到第 1 步，选择另一个随机数，这样序列就会迅速重复，否则……
- 第 5 步：定格显示器。
- 第 6 步：等待用户再次按下按钮。然后回到第 1 步，重复以上步骤。

你发现这些步骤有什么问题了吗？试着从微控制器的角度来想象一下。如果在程序中收到以上指令，你是否事事清楚，可以工作了呢？

答案是否定的，因为缺少一些指令。第 2 步点亮对应的 LED，但是根本没有任何指令来关闭它们！

你一定要牢记：

> 计算机只执行你命令它去做的事情。

如果你想让被点亮的 LED 在显示新的数字之前熄灭，就需要添加相应的指令。

应该把它加在哪里呢？我需要在每个新数字选取和显示之前立即清空显示器。因此，清空显示器的正确时刻应该在主循环的开始时刻，将它记为第 0 步。

> 第 0 步：熄灭所有的 LED。

但是请稍等。由于前一个循环显示了数字，点数图案中的某些 LED 会点亮，而有些会熄灭。如果我们熄灭所有的 LED 以清空显示器，就会包括其中一些已熄灭的 LED。微控制器不会在意这一指令，但是执行指令会浪费一些时间。或许只熄灭原先点亮的 LED，忽略已经熄灭的 LED 会更有效率。

这样，程序会变得更加复杂，也许并没有什么必要。在编程的早期，人们需要**优化**程序，以减少处理器周期，但我认为微控制器的速度已经足够快了，我们不需在意为熄灭两三个已经熄灭的 LED 所浪费的时间。我将使用通用方法熄灭所有的 LED，无论它们当前的状态如何。

按钮输入

伪代码指令中还缺少了什么呢？

缺少与按钮有关的指令。

我需要再次想象程序的功能。显示器正在迅速地循环显示数字，用户按下按钮，停止循环，显示器定格，显示当前的数字。在第 6 步中，微控制器会一直等待，直至用户再次按下按钮，开启新的循环。

请稍等。用户怎么能不先释放按钮，就“再次”按下它呢？

在当前的伪代码下，微控制器的确会这样执行任务，请注意，它的执行速度非常快。

- ❒ 程序命令微控制器检查按钮状态。
- ❒ 微控制器发现按钮已经按下。
- ❒ 显示器定格；微控制器等待按钮再次按下。
- ❒ 但是微控制器发现按钮仍然处于被按下状态，因为用户不能及时松开手。
- ❒ 微控制器说：“哦，按钮按下了，所以我应该重新开始迅速的显示循环。”

因此显示器只会定格一瞬间。

下面是问题的解决方法。在序列中要增加一个步骤。

第 5A 步：等待用户释放按钮。

此步骤将阻止计算机继续运行、显示更多的数字，直到用户准备好为止。

这样就足够了吗？我们完成任务了吗？

恐怕还没有。你可能感到有些费劲了，但是我不得不说：很遗憾，这就是编程的真相。如果有人告诉你，你可以把几条指令输入到计算机上，然后看着它们运行，那恐怕不是真的。

关于按钮还有另一个问题。第 6 步是等待按钮再次按下，再重启迅速的显示循环。用户按下按钮，显示重新开始——但是微控制器的速度太快，它会瞬间冲过显示器清零和显示新点数图案的过程，在用户来得及松开按钮之前，它会再次重新检查按钮的状态。因此，当微控制器运行到第 4 步时，它会发现按钮仍然处于被按压状态，所以它会继续定格显示器。

现在该怎么办呢？也许我应该加入第 7 步，命令微控制器在重启快速显示之前，等待按钮松开？

这是违反直觉的。我觉得，没有人会理解你需要按下按钮，在重新开始显示之前**再松开它**。我们只能说：“哦，你不得不这样做，因为这是程序所要求的。”**这种思维方式非常糟糕**。

程序必须执行用户所要求的任务。我们永远不能强迫用户执行某些操作去满足程序。

任何情况下，等待按钮在快速显示重启之前松开的想法都不可行，而且还存在另外一个问题：触点颤动。该现象在按钮按下和松开时都会发生。因此，如果有人松开按钮，快速显示重启，而程序在一毫秒后再次检测按钮状态时，按钮的触头可能仍在颤动，它们可能显示为断开或闭合状态，难以预测。

当微控制器与物理世界相互作用时，经常会遇到这样的情况。微控制器希望所有事物都精确、稳定，而物理世界既不精确，也不稳定。

在确定如何解决这个问题之前，我需要仔细考虑一下这个问题。

一种解决方法是用两个按钮控制电路，一个开启快速显示，另一个停止显示。这样，“开始”按钮一按下，微控制器就可以忽略它的状态和触点颤动，只等待“停止”按钮按下。

但是从用户的角度来看，我喜欢只有一个按钮，这样比较简单。肯定有一种方法能够实现吧？

我尽可能清晰地重新描述程序的预期功能。我告诉自己：“我希望在按钮第二次按下时，程序能立即重启快速显示序列。但是在那之后，程序应该忽略按钮，直到按钮松开且触点停止颤动。”

为什么不直接把按钮锁定一两秒钟呢？这个想法其实很不错，因为在用户再次停止显示器之前，

随机显示还会再运行一小会儿。这样，显示器会显示一些数字序列，使它看起来“随机性更好”。

假设我在快速显示开始后，将按钮锁定两秒钟。第 4 步应当进行如下修改。

> 第 4 步：如果按钮没有按下，或快速显示持续时间小于两秒钟，则回到循环顶端，选择另一个随机数。否则……

请注意“或”这个词。这些布尔操作符用起来非常方便。

系统时钟

我认为我已经解决了所有与按钮有关的问题，但是新的问题又出现了。我需要计时两秒钟。

微控制器内部是否有系统时钟呢？有可能。或许 C 语言能够调用它，让它测量一定的时间间隔。

查找 C 语言的参考代码，有一个名为 `millis()` 的函数可以测量毫秒。它就像时钟，每次程序开始运行时都从零开始计时。该函数能够计到很高的数值，它运行约 50 天后才能达到最大限度，从零重启。它肯定能满足我们的要求。

但是还有一个小障碍。Arduino 电路板不允许我重置系统时钟。程序一开始运行，时钟就像秒表一样开始计时，但与秒表不同的是，我不能停止时钟。

怎么解决这个问题呢？我只能按照现实生活中使用时钟的方法来使用系统时钟。我想煮鸡蛋时，会默记水煮开的时间，假设这个时刻是下午 5:02，我想把鸡蛋煮七分钟。我对自己说：“5:02 加上七分钟是 5:09，所以我将在 5:09 把鸡蛋取出。”

与此同时，我的脑海里正在将不断运行的时钟与记忆的时刻 5:09 相比较。我想：“时间到 5:09 了吗？”当时钟显示的时间是 5:09 或更晚，鸡蛋就煮好了。

骰子图案程序的做法是：引入一个变量，它的工作方式类似于我在开始煮鸡蛋时的记忆。在快速显示开始之前，我在该变量中存储系统时钟的当前值 +2 秒。然后我可以让程序比较——“系统时钟是否达到了变量的值？”——直至最终到达。

假设我将该变量命名为 `ignore`（忽略），这个变量能告诉我程序应该在未来何时停止忽略该按钮。第 4 步可以询问微控制器：“系统时钟计时是否超过了 `ignore` 变量规定的时间？”如果已经超过，程序就可以恢复对按钮的注意了。

我不能重置系统时钟，但是可以重置 `ignore` 变量，让它与 `millis()` 的当前值匹配，每次新的一轮快速显示开始时，再将变量加上 2 秒钟。

伪代码终稿

考虑到了以上的所有问题，我在此给出修改后的程序流程，但愿这是最终稿。

- ❒ 循环开始之前，建立逻辑引脚的输入和输出；设置“ignore”变量为系统时钟的当前值再加 2 秒钟。

- ❐ 第 0 步：熄灭所有的 LED。
- ❐ 第 1 步：选择一个随机数。
- ❐ 第 2 步：将它转换成骰子点数图案，点亮对应的 LED。
- ❐ 第 3 步：检查按钮是否已经按下。
- ❐ 第 4 步：检查系统时钟是否已经达到 `ignore` 变量的取值。
- ❐ 第 4a 步：如果按钮未按下，或系统时钟未达到 `ignore` 变量的取值，回到第 0 步；否则……
- ❐ 第 5 步：定格显示器。
- ❐ 第 5a 步：等待显示器释放按钮。
- ❐ 第 6 步：等待足够长的时间，直到用户再次按下按钮，重新启动显示器。
- ❐ 第 7 步：重置系统的 `ignore` 变量，加 2 秒钟。
- ❐ 回到第 0 步。

这样可以正常工作了吗？让我们一起来看一看。

硬件设置

图 5-94 所示面包板上连接有七个 LED，用来显示骰子的点数图案。LED 的设计概念与图 4-146 相同，而不同之处是 Arduino 电路板可以从每个输出引脚发出 40 mA 的电流，因此我不需要驱动两两串联的 LED 了。单个输出引脚可以很容易地驱动一对并联 LED，而对于每个通用 LED 而言，330 Ω 的电阻器已经足够。

图中的导线编号与图 4-146 中的导线编号一致。编号与骰子的点数无关，只是标识所有导线的一种任意方式。我也可以将编号为 1 至 4 的导线插入 Uno 电路板上的 1 至 4 号数字输出位置，这样一切都会更清楚。

我将使用 Uno 电路板上的数字连接 0 作为检查按钮开关状态的输入。但是，请注意，Uno 电路板在接收 USB 数据时，使用数字引脚 0 和 1。如果上传程序时有任何问题，可以暂时断开数字输入引脚 0 的连接线。

先不要将面包板的地线连接到 Uno 电路板上。

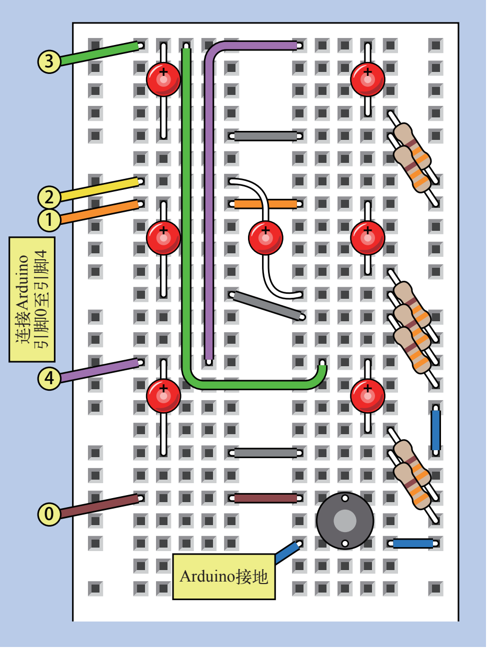


图 5-94 面包板上连接七个 LED，用来显示骰子的点数图案

首先上传程序比较安全，因为程序会告知微控制器，哪些引脚是输出，哪些引脚是输入。原先的程序对引脚的配置可能不同，而且只要 Arduino 电路板通电，它就会运行存储器中存储的任何程序。这对于 Arduino 的输出可能不够安全，因为：

你必须非常小心，不要将电压施加到已指定为输出的数字引脚上。

程序编写

图 5-95 展示了我根据伪代码写出的程序。图 5-96 中展示了同样的程序，删去了注释，这样你就能更快地输入了。请将程序输入到 IDE 软件的编辑窗口中。

```
// Nicer Dice
// by Charles Platt

int spots = 0;      // How many spots to display.
int outpin = 0;     // The number of an output pin.
long ignore = 0;    // When to stop ignoring the button.

void setup()
{
  pinMode(0, INPUT_PULLUP);
  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  ignore = 2000 + millis();
}

void loop()
{
  // First, we must blank the display.
  for (outpin = 1; outpin < 5; outpin++)
  { digitalWrite (outpin, LOW); }

  // Now pick a random number from 1 through 6.
  spots = random (1, 7);

  // Now display the appropriate spot pattern.
  if (spots == 6)
  { digitalWrite (1, HIGH); }    // Side pair of spots

  if (spots == 1 || spots == 3 || spots == 5)
  { digitalWrite (2, HIGH); }    // Center spot

  if (spots > 3)
  { digitalWrite (3, HIGH); }    // Diagonal spots, left

  if (spots > 1)
  { digitalWrite (4, HIGH); }    // Diagonal spots, right

  // Add a small delay for a pleasing display speed.
  delay (20);

  // After 2 seconds have passed, stop ignoring the button.
  // If the button is pressed, call the checkbutton function.
  if ( millis() > ignore && digitalRead(0) == LOW )
  { checkbutton(); }
}

// This function waits for the button to be released,
// then waits for it to be pressed to start the next run.
void checkbutton()
{
  delay (50);                       // Button pressed; debounce.
  while (digitalRead(0) == LOW)     // While button is pressed,
    { }                             // do nothing while waiting.
  delay (50);                       // Button released, debounce.
  while (digitalRead(0) == HIGH)    // While button is released,
    { }                             // do nothing while waiting.
  ignore = 2000 + millis();         // Set the new ignore time,
}                                   // and return to the main loop.
```

图 5-95　改进骰子的程序代码

```
int spots = 0;
int outpin = 0;
long ignore = 0;

void setup()
{
  pinMode(0, INPUT_PULLUP);
  pinMode(1, OUTPUT);
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  ignore = 2000 + millis();
}

void loop()
{
  for (outpin = 1; outpin < 5; outpin++)
  { digitalWrite (outpin, LOW); }

  spots = random (1, 7);

  if (spots == 6)
  { digitalWrite (1, HIGH); }

  if (spots == 1 || spots == 3 || spots == 5)
  { digitalWrite (2, HIGH); }

  if (spots > 3)
  { digitalWrite (3, HIGH); }

  if (spots > 1)
  { digitalWrite (4, HIGH); }

  delay (20);

  if ( millis() > ignore && digitalRead(0) == LOW )
  { checkbutton(); }
}

void checkbutton()
{
  delay (50);
  while (digitalRead(0) == LOW)
    { }
  delay (50);
  while (digitalRead(0) == HIGH)
    { }
  ignore = 2000 + millis();
}
```

图 5-96　相同的程序代码，移除了注释行

输入程序时，你会发现第二个 if 语句中含有你未曾见过的符号，实际上你可能从未在键盘上输入过它。它是一条竖直线，Windows 系统中，对应的键在 Enter 键上方。同时按下 Shift 和后斜线 \ 符

号，就可以输入这个符号。第二个 `if` 语句中使用了两对 `||` 符号，我将在逐行讲解程序时解释。

输入完成后，点击 IDE 软件上的“程序 > 检查 / 编译”选项，检查是否有错误。

有些错误信息可能难以理解，它们指向代码行编号，但是行编号在程序中不予显示！这好像一个残酷的玩笑，告诉你哪一行有错误，但是不显示行编号。也许有方法能打开行编号显示？点击“帮助”选项，输入“line numbers”（行编号），你应该什么也找不到。登录 Arduino 论坛，你会发现有很多人抱怨说无法显示行编号。

对了，论坛把老帖子放在最顶端。如果你滚动鼠标，查找最新的帖子，就会发现问题最终已经得到了解决。Arduino 没有局限在仅仅将问题存档。点击“文件”（File）>“偏好设定”（Preferences）”，你会看到打开行编号显示的选项。

当然，错误信息可能有些难以理解，但以下是最常见的错误原因，你应该在修改程序之前认真检查。

- ❒ 你可能忘记在语句末尾输入分号。
- ❒ 你可能忘记输入结尾处的大括号。请记住，大括号 { 和 } 必须成对。
- ❒ 命令字经常大小写字母都包含，如 `pinMode`，你可能把它全部打成了小写字母。命令字输入正确时，IDE 会将它们显示成红色。如果你发现有的命令字为黑色，那么它就含有拼写错误。
- ❒ 你可能漏掉了函数名中的圆括号，例如 `void loop()`。
- ❒ 你可能在应该输入 == 符号的地方只输入了一个 = 号。请记住，后者意为“赋值”，而前者意为“比较值”。
- ❒ 你可能在应该输入 `||` 或 `&&` 符号的地方只输入了一个 `|` 或 `&` 号。

检查 / 编译操作没有发现更多错误信息时，就可以上传程序了。现在插入连接面包板和 Uno 电路板的接地线，LED 就会开始闪烁。等待几秒钟，按下按钮，显示器定格，显示随机的点数图案。再次按下按钮，显示重新开始。按住按钮不动，经过两秒钟的“忽略”时间后，显示再次定格。

伪代码成功实现了！

那么，程序是如何工作的呢？

短整数和长整数

程序中包含了一些你从未见过的命令字，以及一个非常重要的新概念。

新的命令字是 `long`。到目前为止，你在每个变量名前输入了 `int`（意为“整数”）。但是 `int` 的取值范围只有−32 768~ +32 767。当你需要存储更大的数值时，可以使用更长的整数，取值范围为−2147 483 648~ +2147 483 647。

为什么不把所有变量设置成长整数呢？这样我们就不必为普通整数的取值而操心了。确实如此，但是长整数的处理时间是短整数的两倍（或以上），占用的存储空间也是两倍。Atmel 微控制器上可

没有太多的存储空间。

系统时钟使用 `millis()` 函数计算毫秒。如果只允许它计到 32 767，也就相当于半分钟多一点的时间。我们可能需要更长的时间，于是函数将数值存储在长整数中。（我是怎么知道的？在程序语言参考资料中读到的。学习计算机语言时，你需要阅读相关文件。）

当我创建 `ignore` 变量以存储系统时间的当前值时，需要对变量进行定义，使其与时钟兼容。因此应该使用 `long` 将它定义为长整数。

如果你想存储超出整数（或长整数）变量规定取值范围的数值，会发生什么呢？程序将产生难以预测的结果。你要确保这种事情永远不会发生。

设置

程序的设置环节比较简单。你以前没有使用过 `pinMode()` 指令，但是它很容易理解。

第一个指令中有一个很有用的参数 `INPUT_PULLUP`，它激活了微控制器内置的上拉电阻器，这样你就不用自己添加上拉电阻器了。但是请注意，这是上拉电阻器而非下拉电阻器，因此引脚的输入状态默认为高电平，当你使用按钮时，它必须将芯片的引脚接地。请记住以下两点。

- 按钮按下时，`digitalRead()` 函数返回低电平值。
- 按钮松开时，`digitalRead()` 函数返回高电平值。

for 循环

在 `void loop()` 函数的开头，还有一种循环称为 `for` 循环，因为它以单词 for 开头。这是一种很便捷的基础循环，可以使微控制器计入一系列数值，在变量中存储每个新数值，同时清除原先的数值。具体语法如下。

- 保留字 `for` 后面的括号中有三个参数。
- 各个参数用分号互相隔开。
- 第一个参数是要储存在指定变量中的第一个值。（正式名称是初始化代码）。本程序中，第一个值是 1，存储在我创建的变量 `outpin` 中。
- 第二个参数是循环停止计数时的值（正式名称是停止条件）。因为循环在该处停止，所以变量中的最后一个值实际会比限度少 1。本程序中，限度小于 5，所以循环将使用 `outpin` 变量，从 1 计到 4。
- 第三个参数是循环在每个周期中向变量增加的值（正式名称是迭代表达式）。本实验中，每次增加的数值为 1，C 语言用 `++` 符号表示。因此，`outpin++` 意为：“每次循环，`outpin` 变量加 1”。

`for` 循环允许你指定所有的条件，它们非常灵活，你应该仔细研读程序语言参考资料中的内容。这里的 `for` 循环只从 1 计到 4，但它也可以很容易地从 100 计到 400，或者你希望的任何范围，由循

环所用整数的类型（int 或 long）所限定。

在循环的每个周期中，微控制器被命令执行某些操作。循环经过定义后，要执行的操作列举在大括号中。与任何程序类似，for 循环可以包含很多操作，每个语句用分号结尾。本程序中只有一个操作：向由 outpin 变量规定的引脚写入低电平状态。因为 outpin 要从 1 计到 4，所以 for 循环将在 1 至 4 号引脚上写入低电平。

现在你可以明白这一段程序的意思了。该循环要熄灭所有的 LED。

有没有更简单的方法呢？当然，你可以使用这四条语句：

```
digitalWrite (1,LOW );
digitalWrite (2,LOW );
digitalWrite (3,LOW );
digitalWrite (4,LOW );
```

但是我想向你介绍 for 循环的概念，因为它非常基础，也非常重要。而且，如果你想熄灭九个 LED，该怎么办？或者如果你想让微控制器使 LED 闪烁 100 次，该怎么办呢？在程序包含重复操作时，for 循环通常是最高效的方法。

随机函数

在 for 循环将骰子显示清零之后，random() 函数就开始工作了，它在圆括号标出的范围之间选择一个数字。我们需要骰子的取值范围是 1~6，那么，为何将范围设为 1~7 呢？因为该函数实际上是在 1.000 000 01~6.999 999 99 范围内选择数值，去掉小数点之后的部分。所以，7 这个上限从未实际达到，而输出将为 1~6。

无论随机数是多少，它都会存储在我的另一个变量中，名为 spots，意为骰子面上的点数。

if 语句

现在，让我们看看 spots 的取值，并点亮对应的 LED。

第一个 if 语句非常简单。如果有 6 个点，这将是我们通过 1 号输出引脚（与左侧和右侧的 LED 相连）写出高电平的唯一一种情况。

为什么不把对角线上的所有 LED 也点亮呢？答案是：骰子取其他值时，它们也会被点亮，而 if 测试的数量越少越高效。你很快就会发现这样设置的优点。

下一个 if 语句使用了前面所提过的 || 符号。一对 || 符号在 C 语言中意为“或”。所以，函数表示：如果骰子的值为 1、3 或 5，那么就通过将 2 号引脚置高电平，点亮中心的 LED。

第三个 if 语句表示：如果 spots 的值大于 3，就需要点亮对角 LED 中的两个。它们用于显示 4、5 或 6 的点数图案。

最后一个 if 语句表示：如果 spots 的值大于 1，则其他的对角 LED 也需要点亮。

你可以查看图 4-146 中的点数图案，检查这些 if 函数的逻辑。此图中的逻辑门要与计数器芯片的二进制输出匹配，所以它们与程序中的 if 函数的逻辑运算操作不同。但是，LED 仍然按照相同的方式两两连接。

闪烁速度

在 if 函数之后，我插入了一段 20 毫秒的延时，因为我觉得这样会使显示更加有趣。如果不加入这段延时，LED 就会闪烁得太快，只能看见模糊一片。加入延时后，你就能看见 LED 的闪烁了，但是速度仍然太快，你无法使显示的点数停在你想要的位置——但是你可以试一试！

你也可以将延时的值修改为大于或小于 20。

创建新函数

现在到了最关键的部分。在我编写的伪代码中，我们已经完成了第 3 步、第 4 步和第 4a 步。我帮你回忆一下。

- 第 3 步：检查按钮是否已经按下。
- 第 4 步：检查系统时钟是否已经达到 ignore 变量的取值。
- 第 4a 步：如果按钮未按下，或系统时钟未达到 ignore 变量的取值，回到第 0 步；否则……

这些步骤可以包含在一个 if 函数中。伪代码可以像下面这样写。

如果（按钮未按下或系统时钟小于 ignore 变量的取值），则回到第 0 步。

但是此处还有一个问题。“回到”一词表示我想把微控制器引导至程序的某个特定部分。这件事情看起来很自然，但在 C 语言中，你应该尽量避免将控制从程序的一部分转移到另一部分。

原因是，大量的“到这里”和“去那里”指令会使程序令别人和你自己都难以理解，六个月后再回头一看，你很难记起自己当时的想法。

C 语言的理念是：程序的每一部分都位于独立的程序块中，程序在需要时进行**调用**。你可以将每个程序块想象成一个顺从的仆人，只执行一项操作，例如洗碟子或扔垃圾。若你需要执行该任务，只要叫仆人的名字就好。

程序块的正确名称是**函数**，这比较让人困惑，因为我们已经接触了 setup() 和 loop() 这样的函数。但是实际上你也可以编写自己的函数，它的工作方式基本相同。

我确定了编写程序的正确方式是将按钮检查函数写成一个函数。我称该函数为 checkbutton()，但是它也可以叫别的名字，只要函数名不是已有的任何函数名即可。

checkbutton() 函数位于程序的底部，前面是 void 一词，因为此函数不向程序的其他部分返回任何值。

void checkbutton() 是函数的头部，之后，函数的语句用圆括号标出，和前面一样。该函数的功能为如下。

- 等待 50 ms，触头停止颤动。
- 等待按钮松开。
- 再等待 50 ms，按钮松开引起的触头颤动结束。
- 等待按钮再次按下（即：等待按钮的松开状态结束）。
- 重置 ignore 变量。

微控制器执行完函数最末的语句之后，它将去向何方？很简单：回到调用函数的语句的下一句。它在哪里呢？在上面的 if 函数下方。这就是调用函数的方法：声明函数名（包括圆括号，括号里有时有参数，但此例中没有）。

你可以也应该在程序中按照自己的意愿创建任意数量的函数，让每个函数执行独立的任务。为了学习相关内容，建议你阅读关于 C 语言的一般参考书。Arduino 的参考文件不太注重函数的细节讲解，因为函数涉及数值传递时较难理解。但是，函数仍然是 C 语言的核心。

结构

以 if(millis()>ignore 开头的一行语句与伪代码中的第 4 步目的相同，只是实现方法不同。该语句没有决定是否让微控制器回到程序开头，而是决定是否调用 checkbutton() 函数。我原先将逻辑总结为“如果（按钮未按下或系统时钟小于 ignore 变量的取值），就回到第 0 步”。修改后的逻辑为：“如果按钮忽略时段结束，且按钮已按下，就返回到 checkbutton() 函数。”

在微控制器执行该逻辑并返回以后，它就到达了主 loop 函数的底端，而 loop 函数总是自动重复。

实际上，该程序只进行一项工作。它选择随机数，并将其作为点数图案一遍又一遍地展示。如果按钮按下，程序停止并等待，但是若按钮再次按下，程序就重启原来的进程。按钮检查操作只是暂时的中断。

因此，该程序的自然结构是：一个主循环，选择并显示数字；如果按钮按下，微控制器就暂时绕到 checkbutton() 函数，再返回。

Arduino 的文件没有提及程序结构，因为它希望你尽快得到结果。因此，它只是强迫你使用强制的 setup 函数，后面跟随 loop 函数，仅此而已。

但是随着程序规模的扩大，你确实需要将它分成自己的函数，以免造成混乱。标准的 C 语言教程会讲解得更加详细。

当然，如果你只是想让 Arduino 做一件简单的事情（例如在房间变冷时打开加热器），那么可以把所有的程序放在 loop 函数里，这样就足够了。但是这样是对微控制器功能的浪费，它还可以做更多事情。但是问题在于，如果你尝试实现更宏大的工程（例如模拟掷骰子），那么指令会很多。分清

程序的结构有助于理清逻辑。

将程序分成函数也有另外一个优点。你可以单独存储函数，之后用在其他程序中。`checkbutton()` 函数可以用在其他类似的游戏中，按下按钮停止程序，再次按下按钮重启程序。

与之类似，你可以在自己的程序中使用别人编写的函数，只要作者不限制函数的版权即可。网上免费提供大量 C 语言函数，其中有很多专供 Arduino 使用，例如，能够控制几乎所有字母数字显示的程序。这样就引出了一条建议，它很重要，却常被程序员所忽略：

> 不要做重复工作。

如果别人允许你使用他们的程序，就不需要浪费时间编写自己的程序了。

这也是 C 语言中，函数的概念如此重要的另一个原因。

是不是太难了?

程序越写越好写。学习曲线起初很陡，但经过一些练习，你就能随手写出一个 `for` 循环了。一切都将变得显而易见。

程序员经常这么说。但是果真如此吗?

有时如此，有时则不然。在创客运动中，我们假设任何人都能控制我们周围的科技世界。事实上我自己也同意这一信念，但是计算机编程将它推到了极限。

我教过编程入门课程，并注意到学生的天资迥异。有些学生认为编程是非常自然的思考过程，而有些学生觉得非常困难，这和智力的关系并不大。

在 12 周，36 小时的一期课程结束时，一名学生写出了自动售货机的完整模拟程序，并绘出了图表，展示了转轮和滚出的硬币。

另一期课程结束，有一名当药剂师的学生无论如何努力学习，都无法正确理解语法，甚至理解不了简单的 `if` 语句。他非常聪明，也受过良好教育，但是他说:“这真让我感到心烦，这让我觉得自己是个傻瓜，但是我又明白自己并不笨。”

他确实不笨，但是我帮不了他，因为我学到了一个基本事实。

> 要想写好程序，你必须学会像计算机一样思考。

不论原因如何，那位药剂师都无法学会像计算机一样思考，他的大脑不能这样工作。他能够向我描述药物的药理、分子结构，等等，但这一切对于他编写程序毫无帮助。

Arduino 市场化以后，市场推广者把它的目标客户描述为有创造性的人和不擅编程的人。人们认为，Arduino 这么简单，所有人都可以使用。

问题是，我这个岁数的人能想到，HTML 的开发理念也是相同的，它的界面如此简单，每个人都可以编写自己的网页代码。确实有一些人自己编写了网页，而不是“所有人”。如今，只有少数人愿意手工编写 HTML 代码（我就是其中之一，但是手工编写代码比较古怪）。

再向前回溯，编程发展的初期，BASIC 计算机语言创建的目的一直是让“每个人”都可以使用它。20 世纪 80 年代，随着台式机的出现，市场推广者预测人们将用 BASIC 语言编写小程序，以管理他们的支票簿或存储食谱。很多人确实尝试过，但是现在还有多少人在继续呢？

我强调这一点的目的是让你安心。如果你觉得编程很困难，不要感到耻辱。你肯定有其他可以从事的技能。实际上，用单个元件搭建电路也是一种技能，因为它需要另一种思考过程。我个人感觉编程比设计电路容易得多，但是对别人来说，可能设计电路才更容易。

“更好的骰子”程序升级

如实验 24 中的程序所示，最显著的升级是增加第二个骰子的显示。Arduino 电路板可以很容易地实现这一点，因为它有别的数字输出引脚，可以驱动第二组 LED。你只需复制程序从显示置零到 `delay(20);` 函数的这一段。将添加的 LED 对应的新引脚编号写入 `digitalWrite()` 函数就完成了！

其他微控制器

前面已经提过了 PICAXE，它的文件很全面，技术支持很优秀，编程语言也比 C 语言易学。那么，为什么 PICAXE 没能激发大家的想象力呢？我不知道，也许是因为它的名字太古怪了。我认为你应该去查询一下，从维基百科上查阅它的条目。

BASIC Stamp 比 PICAXE 的指令库更全面，扩展设备更多（包括能显示图像的显示器，以及专门用于控制器的小键盘）。你可以买到这样的微控制器：表面安装类型元件密集地安装在一块小电路板上，可以插入面包板，如图 5-97 所示。设计非常精美。

缺点在于，你会发现与 BASIC Stamp 有关的所有元件都比 PICAXE 的相关元件贵，而且下载步骤也没有 PICAXE 简单。

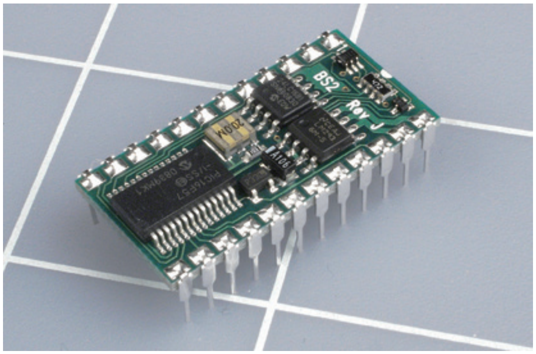


图 5-97 BASIC Stamp 微控制器由安装在引脚间距为 1/10 英寸的平台上的表面安装元件构成，可以安装在面包板或多孔板上

树莓派等新产品扩展了微控制器的功能，使它成为了真正的计算机。你读到这本书时，这个日新月异的世界还会出现更多可选产品。在你准备仔细学习其中一种微控制器之前，我认为花一天两天浏览在线文件和论坛很值得。

在我考虑学习新东西时，我会在 Google 上搜索如下条目：

微控制器问题或难点

（在搜索词条中，我会把具体的产品名称换成“微控制器”）。

这不是因为我的本性消极，我只是不想在很多问题都未解决的产品上花费太多时间。

未探索的领域

现在，我要写一些总结性的内容了。

如果花时间亲自完成了本书的大部分实验，那你就已经快速入门了电子学最重要的领域。

在这一路上，你错过了什么呢？以下是一些课题，等待你去探索。如果你感兴趣，可以到网上去搜索。

我在本书中介绍的发现学习法不是一种正式的学习方法，涉及理论知识很少。我略去了严谨学习电子学所需掌握的大部分数学知识。如果你有学习数学的天资，可以利用它更深入了解电路的工作方式。

我们没有太多涉及二进制编码的内容，也没有搭建半加器，它是学习计算机最基础工作原理的理想工具。但是在 *Make: More Electronics* 一书中，我将向你展示如何搭建半加器。

我也没有详述交变电流那迷人和神秘的特性。此处也需要一些数学知识，而且高频电流的特性本身也是一个有趣的课题。

由于已经叙述的原因，我避免使用表面安装元件，但是如果你喜欢制作小型设备，可以自己去探索这一领域，所需要的资金也不多。

书中没有提及真空管，因为现在它们基本已经成为历史。但是真空管也可以非常特别、美丽，尤其是把它们安装在好看的家具上之后。在技艺高超的工匠的手中，真空管放大器和收音机都变成了艺术品。

我没有讲解如何自己刻蚀印制板电路。这个任务只适合特定的人群，而准备工作要求你手工绘图或用计算机软件绘图。如果你恰好有这些资源，可以尝试自己进行刻蚀工作。这可能成为你大规模生产产品的第一步。

我没有讲到关于静电的任何问题。高压电火花没有任何实际应用，可能引发一些安全问题，但是也极其令人印象深刻，你可以很容易地获得搭建设备的必要信息。或许你应当尝试一下。

运算放大器和更高级的数字逻辑也是我此处未讨论的课题。但是，在 *Make: More Electronics* 一书中会有所涉及。

结语

我认为，一本入门指南的目的是带你遍览各种可能性，然后让你自己决定想要深入探索的领域。电子学非常适合喜欢自己动手操作的人，因为几乎所有的应用——从机器人，到无线电控制的飞行器，到远程通信，再到计算机硬件——都可以由一个人凭借有限的资源在家中完成。

在最感兴趣的领域中继续钻研，你一定会有满意的学习经历。但我最希望你能玩得愉快。

6

第 6 章

工具、设备、元件和耗材

本章分为五节。

套装：这里准备了各种套装，内含元件和耗材。你可以使用它们完成本书的实验。

在线搜索和购物：你可能更喜欢自己购买元件，而不想买工具箱。我编辑了一些小建议来帮助你。

耗材和元件清单：你可以再此找到所需物品的详细记载，包括耗材表和元件表。

购买工具和设备：我列出了本书每章开头提及的所有工具，并给出了如何购买的建议。

供应商：这是一张资源列表。表中的简称用于购买指南。

套装

本书即将出版，而本书实验所需使用的工具箱仍有待完善。工具箱应当包含前 3 章用到的所有部件，附加工具箱应当提供第 4 章所需的部件。也可以单独买到焊接工具箱。

若需更多信息，请访问 www.plattkits.com。

随着更多选择出现，网页将更新。请注意，工具箱可能由独立供应商提供，不隶属于创客媒体。

在线搜索和购物

关于搜索部件，我将提供一些整体的建议，因为本书第 1 版的许多读者都在搜索时遇到了困难。我将从最基本的注意事项讲起，然后逐渐上升。即使是经验丰富的消费者也可能发现几条有用的建议。

所有推荐供应商的综合列表请见供应商一节。下面介绍几家主流供应商。

电子元件可以在网上的大型零售商处买到，其中大部分不强制最小购买数量。你显然可以选择 Mouser、Digikey 和 Newark，这几家存货很多。请访问：

Mouser Electronics（http://www.mouser.com，从得克萨斯州运货）

Digi-Key（http://www.digikey.com，从明尼苏达州运货）

Newark element 14（http://www.newark.com，从亚利桑那州运货）

另外，不要忘记 eBay，它的价格通常比其他供应商低，亚洲供应商价格尤其低。购买需求较少的部件（例如逻辑芯片）时，eBay 帮助不大。

eBay、亚马逊和 Sears 都销售工具和设备，但是如果你需要极好的精选品，那你一定要上 McMaster-Carr（http://www.mcmaster.com）。

网上还有非常优秀的教程，例如，讲解各种塑料的特性课堂，还有不同钻头相对优势的教程。

搜索的艺术

最容易搜索的是特定的部件编号。你可以将它键入网站（例如 mouser.com）的检索字段，算法很智能，能够允许一些灵活性。例如，假设你想搜索 7402 逻辑芯片，Mouser 会帮助你搜索到德州仪器生产的 SN7402N 芯片，这可能就是你所想要的。请注意，德州仪器一般把 SN 加在基本芯片类型的前面，N 加在后面。

但是，如果在部件编号的中间还有另外的编码，搜索引擎将不会有帮助。当你搜索 7402 芯片时，Mouser 不会显示任何 74HC02 芯片族的搜索结果，因为 HC 加在中间。

尝试聊天功能

假设你只有残缺的部件编码，或者你不知道该部件是否已经废弃，或者你只需要一点帮助。不要忽略语音呼叫选项。大型经销商会配备销售代表，帮助你选购元件，个人购买小批量的元件也可以得到帮助。

更好的方式是打开聊天窗口。这样，你就可以将部件编码复制粘贴到窗口中，如果该部件已经无货，你很快就能得到答复，获得类似的产品的推荐。

Google 搜索部件

如果你想货比三家，可以使用通用搜索引擎。假设 Google 是你的默认搜索工具，因为我觉得对于我们的目的而言它最为合适。

如果部件编号又长又复杂，使用 Google，你就更有可能找到你所需要的部件，而不会买到不需要的产品。在 Google 上搜索 7402 芯片，显示的结果会包括 Pantone 墨水颜色和卫生标准研究院。搜索 74HC02 会将结果限制为芯片。

遗憾的是，你现在很有可能受到大量数据表转销商的骚扰。这些公司从电子产品制造商处收集

数据表，重新包装，加上为此“服务”付费的广告。这没有关系，只是转销商通常一次只展示一页数据表，因为每页数据表都有新的广告，转销商用这些广告赚钱。等待每页数据表显示十分浪费时间，所以我经常用连字符作为减号，去除用 Google 搜索元件时搜到的数据表，例如：

```
74HC02 -datasheet
```

请注意，当你指定部件编号后，搜索引擎就不太可能补偿你犯的小错误了。Google 知道当你输入的“电子圆器件”应该是“电子元器件”，但是不知道你输入的 84HC02 芯片实际应该是 74HC02 芯片。

数据表

如果你想查看数据表，需要在购买元件之前查看规格，又该怎么查找呢？访问大型经销商的网页，找到需要的部件，就会看到点击数据表图标的选项。该链接指向一份可打印的多页文件（一般为 PDF 格式），由元件生产商编写。对我而言，这样比应付 Google 上的数据表转销商快得多。

一般的搜索技巧

如果你要搜索一种元件类型，一个短小、模糊的词语通常是不够的。假设你搜索：

switch（开关）

我的搜索结果第一条是电灯开关，第二条是一家本地的酒吧，然后我搜到了各种网络交换机（类似于路由器）。我还找到一家名为 Switch 的公司，专门帮人找工作。怎样避免这些不相关的搜索结果呢？

第 1 步：加一个词，描述搜索领域。例如：

switch electronic（电子开关）

还有更好的方法。如果你想查询额定电流 1A 的双极双掷拨动开关，只需输入：

“toggle switch”dpdt 1a（“拨动开关”双极双掷 1A）

请注意，引号确定了短语，阻挡 Google 显示擦边的不相关选项。还要注意，搜索词对大小写不敏感，不用将 dpdt 输入为大写字母。

你可以通过规定供应商的名称，进一步限制搜索结果，例如：

“toggle switch”dpdt 1a amazon（“拨动开关”双极双掷 1A 亚马逊）

如果可以访问亚马逊，就在该网站上搜索，那么为何要提及 Google 呢？因为亚马逊的搜索功能比 Google 略差，在该例子中，它无法辨认出引号的用法。

幸运的是，亚马逊允许 Google 搜索它的所有网站，为所有产品做索引，这样 Google 的搜索结果就可以把页面直接引到亚马逊的拨动开关列表上。

排除

使用删减选项排除你不想显示的条目。例如，如果你只对大型拨动开关感兴趣，可以输入：

“toggle switch”dpdt 1a amazon -miniature（“拨动开关”双极双掷 1A 亚马逊 -小型）

请注意：亚马逊的搜索框也不能理解减号的语法。

替代选项

不要忘记“与”和“或”逻辑算子。如果单极双掷开关和双极双掷开关一样都能满足你的需要，可以在 Google 上搜索：

“toggle switch”dpdt OR spdt 1a -miniature（“拨动开关”双极双掷 OR 单机双掷 1A 亚马逊 -小型）

但是，尽管如此，也会有一些问题，因为电子学的命名惯例可能不一致。有些人称双极双掷（DPDT）开关为 2P2T 开关，称单极双掷（SPDT）开关为 1P2T 开关。你需要用很多“或”覆盖这些替代选项。

打的字太多了?

我个人认为，仔细排列、详细的搜索词能免去后续的搜索，从而节约时间。

但是，如果你不想键入详尽的搜索词，也有其他的选择。一种方法是点击 Google 在每组搜索结果上方显示的“图片”选项（在“网页”选项旁边）。Google 图片会展示每种可能的开关类型，因为我们的大脑能够迅速地识别图像，所以快速浏览一系列图片比浏览大量的文本更有效率。

或者，你可以点击 Google 搜索结果上方的“购物”选项，它将帮助你按照价格次序列出数十家或数百家不同供应商的产品。但是，有一些供应商不包含在内。

供应商分类

另一种方式是访问供应商的网站，使用他们的分类系统。如果在 mouser.com、digikey.com 和 Newark.com 上搜索“switch”一词，会显示各种类型的开关。点击你需要的类型，可以缩小每次的搜索范围。

最后，在 mouser.com 和其他的大型供应商网站上，你可能会看到一个小窗口，列举了部件的属性，例如额定电压、电流和其他值。这可能比较难以理解，因为列表管理并不智能。例如，有些额定

电流为半安培的开关标示为 0.5 A，而有些开关标示为 500 mA。这些标识完全相同，但是制作表单的人似乎只是将规格参数从数据表上照抄过来，同一个参数，有些以安培为单位，而有些使用毫安。

怎么办呢？使用 Control 键（或 Mac 上的 Command 键）。按住 Ctrl 键（或 Command 键），同时点击附加选项，这样你就可以选择 0.5 A 的开关与 500 mA 的开关与其他可能合适的开关——包括 1 A 的开关，因为额定电流较大的开关在较低的电流下也能正常工作。

先点击哪个分类?

在访问供应商网站时，最好从自己最需要的属性开始选择。例如，如果你要购买逻辑芯片，就从通孔类型开始选择，因为你肯定不想要表面安装类型的小芯片。但是请注意，DIP（Dual In line Pin，双列直插引脚式）封装和 PDIP（Plastic Dual In lin Pin，塑料 DIP）封装基本一致，后者与通孔元件类型相同。

相反，由字母 S 开头的缩略词标识的任何芯片规格都是表面安装类型，这是你不需要的。特别是 SMT（Surfacw Mount），其意为表面安装。

实际搜索

下面的例子展示了我如何一步步搜索到本书使用的一个部件。我知道该部件的用途，但是不知道它的编号。

我需要在“有趣的骰子”电路中使用 3 位输出计数器（参考实验 23：翻转和弹跳）。于是我访问了 Mouser Electronics 的网站，开始搜索：

`counter`（计数器）

输入搜索词时，Mouser 建议了自动补全的词条：

`counter ICs`

IC（Integrated Circuit，集成电路）就是芯片。于是我点击了自动补全词条，转到了有 821 个匹配结果的页面。滚动窗口允许我通过确定生产商、计数器类型、逻辑芯片族等信息缩小搜索范围。我应该如何继续呢？

我水平移动到了选择安装方式的窗口。只有两个选项：SMD/SMT（表面安装芯片）和通孔（插入面包板的芯片，不需放大镜）。我选择了通孔选项，点击 Apply Filters（实施过滤）按钮，一共获得 177 个匹配结果。

本书所有的逻辑芯片都是 7400 芯片族的 HC 类型，因此我进入 Logic Family（逻辑芯片族）窗口，点击了 74HC。但是不要这么快！我知道 Mouser 经常把同一件产品列在不同的名称下面，所以又浏览了其他选项。果然，我找到了单独列出的 HC。我按住 Ctrl 键，选择了这两项。

现在我只有 52 个选项了。因为需要二进制输出，所以我选择了二进制计数器。这样就只剩下 33 个选项。

芯片没有 3 位输出的类型，但是我可以使用 4 位输出芯片，忽略最高数位。我看到“Number of Bits”（位数）中有 4 和 4-bit 两个选项，我按住 Ctrl 键，选择这两项。

计数顺序有 Up（正序），也有 Up/Down（正 / 逆序）。我只想正序计数，所以选择了该选项。现在只有九个匹配结果了！应该好好观察一下了。我想使用最常见的芯片，看看每种芯片的库存有多少就可以决定。德州仪器生产的 SN74HC393N 芯片有 7000 多个。

我点击了数据表的链接，以确认它是否能满足我的需求 14 引脚芯片，能输出 ±25 mA 的连续电流，额定电源电压为 5 V——是的，这是 74HC*xx* 芯片族的标准逻辑芯片。实际上，它包含两个 4 位计数器，而我只需用到其中一个，但我不想在这件琐事上计较。我意识到，如果要扩大项目的规格，可以利用芯片中的第二个计数器。

74HC393 的价格约为 50 美分，不妨在购物车中放六个，一共也只有 3 美元。也许我应该再买一些较小较轻的元件，这样就不用加付运费了。但是，我先打印了 74HC393 的数据表，把它加入了我的文件夹。

你会发现，整个过程需要多次点击鼠标。但是总时间不过 10 分钟，我就找到了需要的元件。

我也可以采用不同的方法。我已知需要 74*xx* 芯片族的芯片，可以访问下面的网址，我把它存成了书签，方便查看：

www.wikipedia.org/wiki/List_of_7400_series_integrated_circuits

该网页包含了所有已生产的 74*xx* 逻辑芯片类型。进入页面，你可以按下 Ctrl-F 搜索文本，然后输入：

`4-bit binary counter`（四位二进制计数器）

输入一定要准确，不能把 4-bit 输成 4 bit。会有 13 个搜索结果显示出来，你可以比较芯片的特性。选择一个芯片，复制它的产品编号，粘贴到 Mouser 等网站的搜索框中，就能找到特定的元件。

唯一的问题是，维基百科的网页没有告诉我哪些芯片型号比较老，已经很少生产，哪些又比较流行。对我而言，为了保证著作的受欢迎度，需要采用最常用的元件。从你的角度来看，这可能也是一个好主意，如果用旧芯片搭建电路，你就把自己锁进了过去。

我还有另一种方法，用 Google 查询人们关于计数器芯片的讨论和建议。但是现在你已经掌握了要义，不需要部件编号也能找到自己所需的元件。

eBay

我在 eBay 上购买了很多部件，因为这里可以划价，而且该网站大多数卖家非常可靠，发货也很快。为了尽量节约时间，减少麻烦，你需要了解一些基本的 eBay 搜索技巧。

首先，不要犹豫，请点击 eBay 首页上搜索按钮右边的“高级搜索”选项。它能帮助你指定元件的属性，例如原产国（如果你想避开海外供应商的话），也可以将搜索范围限制在“一口价”商品。你还可以指定最低价格，有助于排除价格太低的劣质商品。在实际开始搜索之前，我通常选择排序方式：价格最低优先。

找到自己所需的商品后，应该检查销售商的反馈评价。对于美国境内的销售商，我选择好评度大于或等于 99.8% 的商家。我从来没在好评度 99.9% 的商家遇到任何问题，但是有时会对好评度 99.7% 的商家服务不尽人意。

如果供应商来自中国大陆、中国香港、泰国等亚洲地区，你大可不必挑剔，很多顾客会因为收货太晚而给出差评。海外供应商会提醒你，小包裹的运输时间为 10~14 天，但顾客仍会抱怨，因而拉低了好评度。实际上，我从海外供应商购买的每件商品最终都能寄到我手里，而且没有偏差。你只需稍微锻炼一下耐心即可。

在 eBay 上查找好要购买的商品后，建议你点击“加入购物车”按钮，而不是“立即购买”，这样你就可以查找同一家供应商的其他商品，将它们同一批购买也会节约时间，减少运输成本。

点击“销售商信息”窗口中的“访问店铺”选项，或者如果销售商没有 eBay 店，也可以点击“查看其他商品”。然后，你就可以在销售商的产品列表中进行选择了。选足了商品，就可以结算了。

你可以与海外供应商直接联系，而不通过 eBay 找到它们。泰国的 Tayda Electronics（在我的列表中简写为 Tay，见供应商一节）比较受欢迎。

亚马逊

我认为亚马逊并不适合购买元件，但它是购买工具和耗材（例如导线或焊料）的好地方。我遇到的唯一问题是亚马逊并不喜欢首先显示最便宜的商品。在每次进行搜索后，都要重复选择该选项，而如果产品分散在不同的店铺分类中，则不能选择重新排序。甚至在允许让列表按照价格最低优先排列时，亚马逊也不如 eBay 智能，不能纳入运输成本。原价 4.95 美元、运费 6 美元的钳子会标记为比原价 5.50 美元、运费 3 美元的钳子便宜。另一方面，亚马逊的运输速度较快，你可以一次购买一批商品，所有东西都在亚马逊的仓库中，可能免运费。

去除自动补全功能

关于 Google，我还有最后一条建议。搜索引擎的默认模式会在你输入搜索词时弹出类似的搜索词列表。我很讨厌自动补全功能的干扰，所以我去除了该功能，你也可以这样做。

在浏览器的地址栏中，输入该地址，打开 Google：

http://www.google.com/webhp?complete=0

将它存为书签，点击该书签，Google 就不会弹出自动补全的词条了。它会静静地等着你输入完毕。

你也可以把地址存为浏览器的默认打开页面。

值得费这么大力气搜索吗?

你可能并不想记忆所有的搜索技巧。这就是我和“创客仓库”提供本书相关实验套装的原因。去购买套装吧，那里面有你所需要的所有元件，这样你就不用上网搜索了。

但是如果你对本书之外的项目产生了兴趣，又该怎么办呢？假设你在网上看到了一个电路，或者想修改电路，又或者想自己设计电路，此时你就需要自己购买部件。即使你只想从一家商店获取资源，搜索技巧也很有帮助。

耗材和元件清单

本书每章的开头都提供了照片和基本信息。请参考前四章的购物清单。

下面你将看到所有元件和耗材的列表，但是我需要阐明这两个词之间的区别。

耗材包括焊料、导线等物品，建议你一次性购买，满足所有实验的要求。考虑每个实验要用到多少英寸的导线并没有什么意义。

元件是实验电路的一部分。只有从原先的电路中移除之后，才可以重复使用它们。举个例子，面包板电路就是由元件组成的。

耗材

下面的耗材能够满足所有项目的需要。请参考供应商一节，查看可以购买耗材的资源列表，以及相关的简称。

连接线

你需要 22 线规的实芯连接线，至少两种颜色（红和蓝），可能也需要另外两种颜色（根据喜好而定）。汽车用导线也可以接受，只要是实芯线。请在 eBay 或 Google 上搜索：

solid wire 22 gauge OR awg（实芯线 22 线规 OR AWG）

其中 AWG 是美国线规的（American Wire Gauge）缩写。你也可以查找有折扣的供应商，例如 all、elg、jam，或者 ada 和 spk 等业余器件供应商。

买多少呢？如果你想做实验 26、实验 28、实验 29、实验 30 和实验 31 中的电感实验，就要用到 200 英尺（约 60.96 m）长的连接线。在缠绕线圈时，可以将颜色不同的线暂时接在一起，之后可以再松开，重新用于其他实验。

如果你想跳过电感实验，建议你购买三卷 25 英尺（7.62 m）长的连接线。比 25 英尺短的连接线

也可以买到，但是每尺长度的价格会增加。

跨接线

我个人不喜欢使用预切割跨接线，但是如果你选择它，买一盒就够了。此外还需要 25 英尺长的未加工连接线，以完成比最长的预切割跨接线更长的连接。查找预切割连接线需要输入正确的搜索词。在 Google 上，应输入：

jumper wire box（跨接线盒）

“box（盒）”是你找到所需物品的关键。它自动排除了两端带插头的弹性连接线，这种连接线通常成捆销售，而不是按盒销售。我认为它们不是理想的选择。

绞线

绞线是可选的附加工具，用于弹性比较重要的情况。一卷 25 英尺长的绞线就足够了。

焊料

焊料通常按重量销售。请参考第 3 章中**必要工具：焊料**一节关于含铅焊料优缺点的论述。不管怎样，你都要确保购买的是带**松香硬心**的**电子焊料**。焊料的直径范围可能是 0.02~0.04 英寸。如果你只想焊接几个电路，3 英尺的焊料就足够了，eBay 上的一些商店可以销售非常少量的焊料。如果还不满意，请尝试 all、elg、jam、ada、amz 和 spk。

热收缩管

这也是可选工具，不过很有用。购买三四种尺寸的一把热收缩管就足够了。因为热收缩管在汽车上也有应用，所以你可以从 hom、har 和 nor 等硬件供应商和业余爱好者商店购买。

多孔板（未电镀）

这只在实验 14 中使用，但是如果你想焊接点对点的连接线，可以用它搭建本书中的任何一个成品电路。一块 4×8 英寸的小多孔板足够三个普通电路使用。未电镀的多孔板比较难找，因为它们大多具有铜或镍制成的焊盘。我认为在进行点对点焊接时，这些焊盘不符合需要，因为它们增加了造成短路的风险。请搜索：

perforated board bare –copper（多孔板–铜）

并尝试搜索 prototyping board（原型板）、proto board（原型板）或 phenolic board（酚醛板）。请注意，在有些地方，未电镀的多孔板也叫作 unclad。在我写作本书时，Keystone Electronics 生产很小、很便宜的未电镀多孔板，mou 和 dgk 有售。你也可以在 jam 找到未电镀的多孔板。

多孔板（有电镀）

这种电路板用于实验 18 的最终版本，但是你当然可以用它把其他电路做成成品。为了方便，请使用铜印制线布局与面包板内导线布局相同的多孔板。这种电路板比较难找，因为它们模式各异，而且你所需要的模式也没有普遍一致的名称。

BusBoard SB830 是“可焊面包板”，现在可在 amz 上购买。在 ada 上，你会找到类似的多孔板，名为 Perma-Proto。GC Electronics 22-508 是另一个选择，可在 jam 上买到。

Schmartboard 201-0016-31（可在 mou 上买到）由面包板和匹配的多孔板两部分构成。生产商建议将多孔板放置在面包板上面，在搭建和测试电路时，将元件插入并通过两个电路板。然后，抬起多孔板，元件已经安装好，可以焊接了。遗憾的是，这种方法可能不适合引脚较短的元件。

机用螺钉（螺栓）

螺钉和带有尼龙衬垫的螺母可以在硬件商店中买到，但将多孔板安装到项目盒中或类似项目所需的小螺丝钉可能缺货。建议你购买 4 号的平头螺栓，长度为 3/8 英寸和 1/2 英寸。我最喜欢的硬件类型是 McMaster-Carr。

项目盒

项目盒的价格差别很大。由 ABS 塑料制成的盒子通常最便宜。试着去打折的商家购买，例如 all、elg、jam，或者去找业余器件供应商 ada 和 spk。

元件

下面列出电阻器、电容器以及其他元件的购买数量和规格。请参考供应商一节的资源列表，以及指代它们的缩写。最大的供应商是 dgk、eby、mou 和 nwk。你可能在 all、elg、jam 和 spk 找到售价较低的商品，但是元件选择余地不大。你应当比较一下从多家供应商购买元件的运费和从一家价格略高的供应商一次性购买所有元件所需的成本。

电阻器

任何一家生产商都可以。引脚的长度通常不重要。本书的所有项目都可以使用额定功率 1/4W 的电阻器（最常见的值）。10% 的容差是可接受的，而 10% 电阻器上的色带比 5% 或 1% 电阻器的更容易阅读。但是，如果你喜欢，也可以购买 5% 或 1% 的电阻器。

本书所有章节使用的电阻器总数如图 6-1 所示，但是由于大量购买的电阻器和电容器非常便宜，所以我觉得为单个实验购买特定数量的元件意义不大。购买包装好的各种元件可以节约时间和金钱。

- ❒ 为使购买的电阻器满足本书**所有**项目的需要（并打出富裕），以下阻值每种至少要买 10 个：47 Ω、220 Ω、330 Ω、1 kΩ、2.2 kΩ、4.7 kΩ、6.8 kΩ、10 kΩ、47 kΩ、100 kΩ、220 kΩ、330 kΩ、47 kΩ、680 kΩ、1 MΩ。另外还需要 20 个 470 Ω 的电阻器。预包装好的电阻器是最佳选择。我规定这些数量时，假设你会在某些电阻器完成简单演示实验后重复利用它们。

电容器

请在上文列出的电阻器资源中搜索电容器。任何一家生产商都可以。建议采用径向引脚的电容器，也就是为两根引脚都从电容器的一端伸出，而不是一边一根。建议工作电压至少为 16 V 直流的电容器使用最大 12 V 的直流电源。你可以用工作电压更高的电容器代替，但是元件体积也会更大。其他额定值，例如温度和阻抗对我们的目的而言并不重要。

陶瓷电容器可以使用数十年，而电解质电容器的寿命还有争议。所需容值较大时，需要使用电解质电容器，因为陶瓷电容器的价格非常昂贵。我个人喜欢使用容值小于 10 µF 的陶瓷电容器和大于 10 µF 的电解质电容器，但是如果使用 1 µF 以上的电解质电容器，可以节约成本。

若想知道本书每章所需电容器的确切数目，请参考图 6-2。

- ❒ 为使购买的电容器满足本书**所有**项目需要（并打出富裕），以下容值每种至少购买要五个：0.022 µF、0.047 µF、0.33 µF、1 µF、2.2 µF、3.3 µF、10 µF、100 µF、220 µF。还需要至少 10 个 0.1 µF 和 10 µF 的电容器。以下容值每种只需两个：15 µF、22 µF、68 µF、1000 µF。我规定这些数量时，假设你会在某些电容器完成简单演示实验后重复利用它们。

电阻器	书内章号					总数
	1	2	3	4	5	
47 Ω				2	1	3
100 Ω				6		6
150 Ω				6		6
220 Ω				8		8
330 Ω				3	8	11
470 Ω	2	6	4	12		24
680 Ω				10		10
1 kΩ	2	2	1	4		9
2.2 kΩ	1			5		6
4.7 kΩ		4	2			6
6.8 kΩ					1	1
10 kΩ		1	1	41	4	47
47 kΩ				1		1
100 kΩ		2	1	4		7
220 kΩ		2				2
330 kΩ				1		1
470 kΩ		4	2			6
1 M		1		4		5

图 6-1　本书每章实验使用的电阻器个数

电容器	书内章号					总数
	1	2	3	4	5	
0.01 µF		2		18	3	23
0.022 µF				1		1
0.047 µF				1		1
0.1 µF		3		9		12
0.33 µF		2		5		7
1 µF		2		4	2	8
2.2 µF					1	1
3.3 µF		2	2	3		7
10 µF		1		8	1	10
15 µF				1		1
22 µF				2		2
33 µF		1				1
68 µF				2		2
100 µF		2		5	1	8
220 µF		1	1		3	5
1000 µF		2			2	4

图 6-2　本书每章实验使用的电容器总数

其他元件

对于除电阻器和电容器以外的元件，搭建第 1 章、第 2 章和第 3 章所有电路所需的最少数量元件如图 6-3 所示。我规定这些数量时，假设你会在某些电容器完成每个实验后，在下一个实验中重复利用它们。第 4 章的元件是前三章以外的其他所需元件。第 5 章所需元件没有在此列出，因为第 5 章的实验元件选择颇多。请参考第 5 章每个实验的开头部分，获取针对各种选择的总结。

如果你担心烧毁易损坏的芯片或晶体管，图 6-3 中的每种元件请多买一个。

如果你想保存一些搭建好的电路，而不想把元件重新用在后续的实验中，那该怎么办呢？请查阅后面的每个实验对应的表格，添加你感兴趣的实验的元件。

下面也提供了搜索和购买元件所需的信息。

请参考**供应商**一节，获取供应商列表，它们用各自的名称缩写指代。大部分元件都可以在 all、eby、elg、jam 和 spk 获得特别优惠，你也可以在 dgk、mou 和 nwk 进行一站式购物，买到所有商品。

第 1 章所需元件

第 1 章所需元件除电阻器和电容器以外，均在图 6-4 中列出。

通用 LED

Lumex SLX-LX5093ID 或 Lite-On LTL-10223W 都是常见型号，但是通用 LED 可以由任何一家生产商提供。直径 5mm 的 LED 可能更易于抓取，但是 3mm 的 LED 更易于安装在布满元件的面包板上。

除电阻器和电容器之外的元件	前3章	第4章
通用LED	4	2
LED（低电流）	1	15
9 V电池	1	
9 V电池连接器	1	
1.5 V电池	2	
1.5 V电池连接器	1	
面包板	1	
500 kΩ微调电位器	1	
100 kΩ微调电位器		1
20 kΩ或50 kΩ微调电位器		1
2N2222晶体管	6	
扬声器（小）	1	
拨动开关	2	
触摸开关	2	6
单极双掷滑动开关		2
继电器9 V直流双极双掷	2	
交流适配器	1	
1N4001二极管	1	
多孔板，3×6英寸	1	
3A保险丝	2	
1 kΩ电位器	2	
柠檬（或柠檬汁）	2	
1英寸镀锌支架	4	
1N4148二极管		3
555TTL型定时器		4
7段LED显示器		3
4026B计数器		3
74HC00二输入与非门		1
74HC08二输入与门		1
LM7805调压器		1
74HC32二输入或门		1
74HC02二输入或非门		1
74HC27三输入或非门		1
74HC393计数器		1

图 6-3　最小元件数，假设你每做完一个实验，就会把元件在下一个实验中重新利用。第 4 章所需元件是除前 3 章以外的其他所需元件

典型的正向电流为 20 mA，正向电压约为 2 V 直流（蓝色和白色的 LED 需要更高的电压）。如果你见到 eBay 等网站上销售的一堆 LED 价格很低，就可以认为它们是通用 LED。

低电流 LED

这些 LED 的额定正向电流应该为 3.5 mA 或以下，例如型号为 Kingbright WP710A10LD 的 LED，生产商、尺寸和颜色都不重要。你可以将这种 LED 用在所有实验上，但若如此操作，就需要将所有串联电阻器的阻值加倍来保护 LED，因为它能允许通过的最大电流可能只有 6 mA。

第1章所用元件	实验					总数
	1	2	3	4	5	
通用LED			1	2		3
低电流LED					1	1
9 V电池	1		1	1		3
1.5 V电池		2				2
1.5 V电池连接器		1				1
3 A保险丝		2				2
柠檬（或柠檬汁）					2	2
1 kΩ电位器					4	4
1英寸镀锌支架				2		2
去离子水（1杯）					1	1

图 6-4　第 1 章除电阻器和电容器之外的元件

电池

9 V 电池可以是普通的碱性电池，从超市和便利店都可以买到。可再充电的 9 V 电池也是不错的选择。

实验 2 使用的 1.5 V、AA 尺寸的电池必须为碱性电池。不要在此实验中使用任何类型的可充电电池。

电池连接器和支架

一个 1.5 V 电池支架就足够了。请注意，电池支架也可以叫作**电池座**。请确认你购买的支架只能放置一块 AA 电池（而不是两个、三个或四个）。Eagle 12BH311A-GR 是一种常见型号。

你至少应该购买三个 9 V 电池连接器，因为你有可能想把它们留在你搭建的电路上。9 V 电池连接器有时也叫作**摁扣式连接器**或者**电池扣**。典型例子是 Keystone 325 型号或 Jameco Reliapro BC6-R。购买最便宜的连接器即可，但是请确保连接器末端伸出导线。

保险丝

理想情况下，实验 2 中的 3 A 保险丝应该为车用保险丝，因为弹簧夹很容易握紧它的刀片。任何一家汽车零部件供应商都会存有这种保险丝。保险丝的物理尺寸不重要。你也可以购买 2AG 尺寸的管式熔断器，它是电子供应商能提供的最小尺寸。它应该是速熔型，而不是延时熔断类型。额定电压并不重要。Littelfuse 0208003.MXP 是一种常见型号。

电位器

实验 4 所需的大型 1 kΩ 电位器，其理想直径应为 1 英寸，但是直径 0.5 英寸也可以接受。额定

功率、额定电压、容差、轴型、轴径、轴长都不重要。请选择电阻呈线性分布，终端为焊接接线片的面板装配类型单匝电位器。要买两个。Alpha RV24AF-10-15R1-B1K-3 和 Bourns PDB181-E420K-102B 是常见型号。

果汁和支架

如果你在实验 5 中用塑料挤瓶盛装柠檬汁，一定要确保果汁未稀释、未加糖。可以用醋代替。

实验 5 中的 1 英寸支架必须镀锌。用于安装导管的管箍和连接器吊带可以作为代替。这些东西可以在任何硬件商店以很便宜的价格买到。

去离子水

去离子水通常叫作蒸馏水。当地超市应该有售，但请确认你买的不是“净化水”，也不是“矿泉水”。水中必须没有任何矿物质。

第 2 章所需元件

第 2 章所需元件除电阻器和电容器以外，均在图 6-5 中列出。

第2章所用元件	实验						总数
	6	7	8	9	10	11	
通用LED	1		2	1	1	1	6
9 V电池	1	1	1	1	1	1	6
9 V电池连接器			1	1	1	1	4
面包板			1	1	1	1	4
500 kΩ微调电位器					1		1
2N2222晶体管					1	6	7
扬声器（小）						1	1
拨动开关（单极双掷）	2						2
触摸开关		1	1	2			4
继电器9 V直流双极双掷		2	1				3

图 6-5　第 2 章中除电阻器和电容器之外的元件

面包板

面包板归类为元件，因为它不能从电路中分离，相反，它还是电路的基础。你需要决定在面包板上保留的电路数量，以及你打算从面包板上拆下的电路数量，这样面包板就可以重复使用了。理想情况下，每块面包板的两侧应该各有一条单总线，板上有 700 个连接点，如图 2-10 所示。请搜索 Google 或 eBay：

`solderless breadboard 700`（无焊面包板 700）

但是，如果你喜欢的话，也可以使用双总线面包板，忽略多余的一排孔。

微调电位器

推荐类型的电位计位于图 2-22 的左右两侧，针对其他类型电位器的讨论在照片下面。额定功率并不重要。推荐使用单匝式电位器，它的引脚间距必须是 0.1 英寸（2.54 mm 或 2.5 mm）的倍数。Vishay T73YP504KT20 是一种低成本 500 kΩ 微调电位器。

晶体管

购买任何 2N2222 晶体管之前，请参考第 1 章的必要工具：晶体管一节，获取重要的警告信息。

拨动开关

此开关应为面板安装类型，有螺栓式接线柱的比较理想，但是有引脚或焊接片也可以。单极双掷和双极双掷型都可以。电压和额定电流对于本书的实验并不重要。常见型号有 NKK S302T，但是你也可以在 eBay 上找到更便宜的开关。

触摸开关

强烈建议使用图 2-19 所示类型的触摸开关，它的两引脚间距为 0.2 英寸，非常适合安装在面包板上。请避免购买更常见的四引脚触摸开关。建议购买型号：Alps SKRGAFD-010（目前 Mouser 有售）。任何引脚间距为 0.2 英寸的触摸开关都可以，例如 Panasonic EVQ-11 系列。

继电器

请参考第 2 章的必要工具：继电器一节，就建议使用的双极双掷 9 V 直流继电器获取相关信息。Omron G5V-2-H1-DC9、Axicom V23105-A5006-A201 和 Fujitsu RY-9W-K 三种继电器都已经过测试，适于使用。

第 3 章所需元件

第 3 章所需元件除电阻器和电容器以外，均在图 6-6 中列出。

第 3 章实验所需的多数元件已在第 1 章和第 2 章所需元件中列出，见上文。

第3章所用元件	实验			总数
	13	14	15	
通用LED	2	1	1	4
9 V直流电源	1	1	1	3
面包板			1	1
2N2222晶体管		3	1	4
1N4001二极管			1	1
继电器9 V直流双极双掷			1	1

图 6-6　第 3 章除电阻器和电容器之外的元件

交流适配器

它的输出必须为 9 V 直流。适配器也可以有另外的输出，提供不同的电压。请参考第 3 章的必要工具：电源一节，获取关于各种选项的讨论。在这里，最小输出应当为 500 mA（0.5 A）直流。

多电压适配器可能比较难以找到。搜索“ac adapter”，你会找到成百上千种单电压适配器。应对方式是在 eBay 等网站上搜索：

```
ac adapter 6 V 9 V（AC 适配器 6 V 9 V）
```

网页会提供几种价格实惠的多电压适配器。请确认适配器的照片上显示有选择各种电压的小开关。

二极管

1N4001 开关二极管既便宜又通用。请购买 8~10 个，同时购买数量近似的 1N4148 信号二极管。

连接头

这些小插头和插座是可选工具。常见型号有：Mill-Max，部件编号为 800-10-064-10001000 和 801-93-050-10-001000，或 3M，部件编号为 929974-01-36RK 和 929834-01-36-RK。

第 4 章所需元件

第 4 章所需元件除电阻器和电容器以外，都在图 6-7 中列出。

滑动开关

建议使用单极双掷滑动开关，三根引脚间距 0.1 寸，如图 4-5 所示。建议使用 E-switch 生产的 EG1218 开关。若要购买其他型号，它的终端必须是焊接引脚，用于安装在面包板上。NKK CS12ANW03 是常见型号，但是如果在 eBay 上搜索：

slide switch breadboard（滑动开关面包板）

你会发现更便宜的开关。对于本书的项目而言，触点电镀类型、额定电压和额定电流都不重要。

集成电路芯片

请参考第 4 章的基础知识：选择芯片一节，阅读关于芯片的讨论。虽然图 6-7 列出了你需要的所有芯片类型（实验 29 额外需要的 555 定时器芯片除外），但我建议每种芯片多买一片，因为它们很容易因电压错误、极性反转、输出过载或静电荷而损坏。

你可以选择任何一家生产商。芯片的“封装”指它的物理尺寸，你应该在订购时仔细检查这一特性。所有的逻辑芯片必须采用 DIP 封装（指双列直插式封装，有两列间距为 0.1 英寸的引脚），这也叫 PDIP（指塑料双列直插式封装）或“通孔”类型。DIP 和 PDIP 后面可能会附加引脚个数，例如 DIP-14

第1章所用元件	实验									总数
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
通用LED	1	4	3	2		1	2		1	14
低电流LED					2	1	1	3	15	22
9V直流电源	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
面包板	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
20 kΩ或50 kΩ微调电位器	1			1						2
微调电位计100 kΩ		1								1
微调电位计500 kΩ	1									1
触摸开关	2	1	1	3	2	8	2		1	20
单极双掷滑动开关			2		1		2	2	2	9
1N4001二极管			1			1				2
1N4148二极管		1				3				4
555TTL型定时器	1	4	4	3		1	2		1	16
扬声器（小）		1	1							2
七段LED显示器				3						3
4026B计数器				3						3
74HC00二输入与非门					1			1		2
74HC08二输入与门					1	1			1	3
LM7805调压器					1	1	1	1	1	5
继电器9 V直流双极双掷			1			1				2
2N2222晶体管			2			1				3
74HC32二输入或门							1		1	2
74HC02二输入或非门								1		1
74HC27三输入或非门									1	1
74HC393计数器									1	1

图 6-7　第 4 章除电阻器和电容器之外的元件

或 PDIP-16。该数字可以忽略。

表面安装芯片的封装描述词由 S 开头，例如 SOT 或 SSOP。不要购买任何“S”封装类型的芯片。

本书只使用 HC 芯片族（High spead Complementary Metal Oxide Semiconductor，高速互补金属氧化物半导体），通用标识为 74HC00、74HC08，等等。生产商会向这些数字添加由字母或数字组成的前缀或后缀，例如德州仪器生产的 SN74HC00DBR，以及半导体 MC74HC00ADG。这些版本的芯片功能都相同。仔细观察，你就会发现每个编号里都有通用编号 74HC00。

老式的 TTL 逻辑芯片（例如 74LS00 系列）存在兼容性问题。本书的任何实验都不使用这种芯片，我也不建议你使用。

555 定时器

与逻辑芯片不同，你需要使用 TTL 类型（也叫作双极型）而非 CMOS 类型的定时器。以下是几则指导方针。

你所需要的 TTL 类型定时器通常在数据表中标明“TTL”或“双极型”，规定最小电源电压为 4.5 V~5 V，静置电流至少为 3 mA，能够发出或吸收 200 mA 的电流。部件编号通常以 LM555、NA555、NE555、SA555 或 SE555 开头。按价格搜索，TTL 类型的 555 定时器最便宜。

你不需要的 CMOS 类型定时器通常在数据表的第一页标明“CMOS”，大多数情况下允许最小 2V 的电源电压，要求静置吸收电流为微安级（而非毫安），发出或吸收的电流不大于 100 mA。部件编号包括 TLC555、ICM7555 和 ALD7555。按价格搜索，最便宜的 CMOS 类型 555 定时器的价格几乎是最便宜的 TTL 类型 555 定时器的两倍。

七段式显示器

实验 19 使用的显示器必须为 LED 设备，高 0.56 英寸，最好为低电流红色显示器，能够在 2 V 正向电压和 5 mA 正向电流下工作。推荐使用 Avago HDSP-513A、Lite-On LTS-546AWC、Kingbright SC56-11EWA 或类似的显示器。

第 5 章所需元件

第 5 章所需元件除电阻器和电容器以外，均在图 6-8 中列出。

钕磁铁

建议将 K&J Magnetics（http://www.kjmagnets.com/neomaginfo.asp）作为资源，因为该网站提供了关于磁铁的丰富信息。

在欧洲，supermagnete.de 是较为流行的资源。

16 线规导线

16 线规导线仅在实验 31 作为天线中使用。如果成本太高，请尝试 50 或 100 英尺长的 22 线规导线。如果你的居住地点距调幅广播电台较近，这应该足够了。

高阻抗耳机

高阻抗耳机仅在实验 31 中使用，可以从 the Scitoys catalog（http://www.scitoyscatalog.com）订购。

你也可以在亚马逊购买。在 eBay 上，请搜索：

crystal radio earphone（晶体收音机耳机）

如果你搜索的是晶体收音机耳机而非耳机，则会找到收音机诞生初期的一些老古董。

锗二极管

锗二极管可以在购买高阻抗耳机的地方购买。dgk、mou 或 nwk 也可以提供资源。

Arduino Uno 电路板

关于资源的讨论，请参考第 5 章的**小心仿制品？**一节。

热敏电阻

第5章所用元件	实验										总数
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
通用LED								1		7	8
低电流LED		1		2							3
9 V直流电源	1					1					2
面包板				1		1			1	1	4
曲别针	1										1
1N4001二极管		1									1
钕磁铁		1									1
廉价扬声器			1								1
触摸开关				1	1						2
滑动开关					4						4
微调电位计10 kΩ					1						1
微调电位计1 MΩ					1						1
555TTL型定时器					1						1
塑料储存箱					1						1
扬声器（最小4英寸）					1						1
LM386放大器芯片					1						1
2N2222晶体管						1					1
16线规导线50英尺							1				1
聚乙烯/尼龙绳10英尺							1				1
高阻抗耳机							1				1
锗二极管							1				1
Arduino Uno								1	1	1	3
USB连接线，两端A型和B型连接头								1	1	1	3
NTC热敏电阻10 kΩ									1		1

图 6-8　第 5 章除电阻器和电容器之外的元件

实验 33 推荐使用的热敏电阻型号为 Vishay 01-T-1002-FP。若要替换，请使用 10 kΩNTC 类型的热敏电阻，额定精度为 1%~5%，带引线。

购买工具和设备

请参考本章**元件**一节获取元件列表，参考**耗材**一节获取耗材列表。

本书每章的开头部分提供了工具和设备的相关照片和基本资料。请参考前 3 章涉及必需工具的几个小节。第 4 章和第 5 章没有附加的工具。

因为产品在不断更新换代，所以我没有列举工具和设备的库存编号或生产商名称。每章开头的说明和照片能提供足够的指导，在大型网站例如亚马逊或 eBay 上搜索，你很快就能找到需要的商品，在一个地方就能找全。

确实，昂贵的工具精度更高，更加耐用，但是最便宜的商品也可以满足本书的实验需要。

请参考供应商一节，获取链接地址。供应商的名称用三个字母的缩写表示。

第 1 章所需工具设备

工具和设备的照片和描述请参考第 1 章。

每种工具只需一件，除非另有说明。

万用表

万用表的特点描述请参考第 1 章万用表一节。好的供应商有 all、amz、eby 和 jam。

测试引线

双头测试引线的两端应为长约 1 英寸的弹簧夹，线长为 12~15 英寸（不可更长）。你至少需要三根红色引线和三根黑色引线。其他颜色也很有用。

不要使用两端带插头的测试引线，它们有时也叫“跨接线”。请在 eBay 上搜索：

test leads double ended alligator（双头测试引线弹簧夹）

你会找到所需的物品。购买 10 根。供应商有 all、eby、jam 和 spk。

护目镜

请在 amz、eby、har、hom、wal 等供应商处查询。建议采用评级为 ANSI Z87 的护目镜（可以将此作为搜索词），不要使用彩色眼镜。

第 2 章所需工具设备

工具和设备的照片和描述请参考第 2 章。

长嘴钳子

钳子的端到端长度应为约 5 英寸，钳口内部平坦而非圆形。供应商为 amz、eby、mcm、mic。

剪线钳

剪线钳也叫斜口钳，端到端长度约 5 英寸。供应商 amz、eby、har、hom、nor、mcm。

平口钳

平口钳为可选工具。供应商为 amz、eby、har、hom、nor、mcm。

剥线钳

需要使用孔尺寸与导线线规编号相符的剥线钳，但是最常用的剥线钳孔尺寸范围（10 至 20 线规）并不适合。

我建议你购买适合 22 线规导线的剥线钳，因为增加剥线的难度毫无意义。请在网上搜索：

wire strippers 20 30（剥线钳 20 30）

你会找到孔径为 20、22、24、26、28 和 30 线规的剥线钳。也可以在 amz、eby、elg、jam 和 spk 搜索。

第 3 章所需工具设备

工具和设备的照片和描述请参考第 3 章。

低功率烙铁

其额定功率应为 15 W，烙铁尖应为细长圆锥形，经过电镀。供应商 all、amz、eby、jam、mcm。

通用烙铁

额定功率应为 30 W 或 40 W。供应商 amz、eby、har、hom、mcm、nor 或 srs。

辅助工具

供应商 ada、amz、eby、jam、spk。

小型短程**放大镜**供应商为 amz、eby、wal。（可能称作 magnifier 或 loupe）

小抓具

Pomona 6244-48-0 型号的抓具供应商为 amz、dgk、mou 和 nwk。更便宜的型号请在 eby 上搜索，它也是两端带弹簧夹的万用表表笔的首选供应商。

热风枪

通常作为通用工具销售，因此可以从五金店购买。供应商为 amz、har、hom 或 nor。小型热风枪可以选择 eby。

拆焊工具

amz、elg、jam、spk 和 eby 等供应商可以提供多种选择。

烙铁架

可以在销售烙铁的同一供应商处获得。

小手锯

我个人比较喜欢 15 号美工刀片，还需要购买与刀片相配的手柄。网上的 Tower Hobbies、Hobbylinc、ArtCity 等多家艺术 / 工艺品商店有售。建议你也购买大号的美工锯条（234 或 239 号），你可以用它切割多孔板。

去毛刺工具

如果本地的五金店没有这种工具，你也可以从 amz、eby、mcm、nor、srs 等供应商和某些专卖店便以低廉的价格购得去毛刺工具。去毛刺工具的标准刀片是为惯用右手的人制作的，也有一些刀片供惯用左手的人使用，但是很难找到。有的刀片比其他刀片更硬；E300 意为该刀片用于切割软金属和大多数塑料。

游标卡尺

我喜欢 Mitutoyo 的卡尺，但是市面上也有很多更便宜的品牌，能满足日常需求。Mitutoyo 的网站会提供所有在售的型号，你只需在 Google 上搜索“Mitutoyo”，找到零售商店即可。很多人都喜欢带数字显示器的游标卡尺，它能在公制单位和英寸间转换，但我更喜欢不需电池的游标卡尺。

铜质弹簧夹

大型通用电子供应商 dgk、mou 或 nwk 都出售铜质弹簧夹，可以少量购买，同时享受低价。

供应商

推荐供应商时，本章使用每家供应商名称前面的字母缩写。

ada：Adafruit（http://www.adafruit.com/）。

all：All Electronics（http://www.allelectronics.com/）。

amz：Amazon（http://www.amazon.com/）。

dgk：Digi-Key（http://www.digikey.com/）。

eby：eBay（http://www.ebay.com/）。

elg：Electronic Goldmine（http://www.goldmine-elecproducts.com/）。

evl：Evil Mad Scientist（http://www.evilmadscientist.com/）。

har：Harbor Freight（http://www.harborfreight.com/）。

hom：Home Depot（http://www.homedepot.com/）。

ins：Instructables（http://www.instructables.com/）。

jam: Jameco（http://www.jameco.com/）。

mcm：McMaster-Carr（http://www.mcmaster.com/）。

mic：Michaels crafts stores（http://www.michaels.com/）。

mou：Mouser Electronics（ http://www.mouser.com/）。

nwk：Newark Electronics（http://www.newark.com/）。

nor：Northern Tool（http://www.northerntool.com/）。

plx：Parallax（http://www.parallax.com/）。

spk：Sparkfun（https://www.sparkfun.com/）。

srs：Sears（http://www.sears.com/tools/）。

tay：Tayda Electronics（http://www.taydaelectronics.com/）。

多数网站还提供详尽的教程和其他有用信息。通过浏览网页，你可以学到很多知识。

关于作者

Charles Platt 于 1979 年得到了一套 Ohio Scientific 公司生产的 C4P 集成系统，从此迷上了计算机。他编写软件，并通过邮件订购销售软件。之后他开始教授 BASIC 编程、MS-DOS 系统，最后是 Adobe 绘图软件和 Photoshop。20 世纪 80 年代，他写了五本计算机教材。

Charles 还写过科幻小说，例如 *The Silicon Man*（最初由 Bantam 出版，之后由 Wired Books 再版）、*Protektor*（Avon Books 出版）。他于 1993 年开始写作 *Wired* 丛书，从此停止了科幻小说的写作，并在数年后成为丛书的三位主要作者之一。

Charles 从 *Make:* 杂志第三期开始相关编写工作，现在是一位特约编辑。目前，他正在北亚利桑那州荒野的工作室中设计建造医疗设备原型。

爱上电子学：创客的趣味电子实验（第2版）

发现学习法

想以轻松娱乐的方式，通过亲手实践来学习电子学的基础知识吗？打开本书，你就踏上了电子实验项目制作的全新旅程。书中一系列令人着迷的实验，带你探索电子学的奇妙胜境。你将先搭建电路，再学习其中的理论！

由简到繁地制作确实能用的电子设备

你将从基础的电路实验项目开始入手，向更加复杂的项目迈进：从开关电路到集成电路，从简单的报警器到复杂的可编程微控制器。

一步步的操作指南以及500余幅全彩照片和图片绝对给力，助你深入理解并灵活运用电子学的概念与技术。

第2版新增内容！

- 全新阐述，既升级了老项目，又引入了新项目。
- 元件更小、更实惠。
- 涵盖Arduino知识！

本书内容

- 通过破坏东西来发现：利用元件进行实验，并从失败中汲取经验。不破不立，对吧？
- 建立起一个像样的小型电子实验场所：在家里开辟一块工作区，装备上必需的工具和元器件。
- 在电路中了解主要电子元器件及其功能。
- 制作侵入报警器、电子骰子、可穿戴电子设备、反应测试仪及组合锁等。
- 清晰解释自己做的实验及其原理。

Charles Platt 计算机图形学教师，科幻作家，代表作为*The Silicon Man*，《连线》杂志资深撰稿人，*Make:*杂志特约编辑。十五岁时搭建了人生的第一个电子项目——一台电话答录机，从此与电子和科普结下不解之缘。

"这是最棒的学习方式！"——Hans Camenzind, 555芯片发明者

封面设计：Marc de Vinck和Charles Platt（英文版）马冬燕（中文版）

Make:
makezine.com

图灵社区：iTuring.cn
热线：(010)51095186转600

分类建议	科普读物／电子

人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn

O'Reilly Media, Inc.授权人民邮电出版社出版

此简体中文版仅限于中国大陆（不包含中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区）销售发行
This Authorized Edition for sale only in the territory of People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macao and Taiwan)

ISBN 978-7-115-43686-3

ISBN 978-7-115-43686-3
定价：99.00元

看完了

如果您对本书内容有疑问，可发邮件至 contact@turingbook.com，会有编辑或作译者协助答疑。也可访问图灵社区，参与本书讨论。

如果是有关电子书的建议或问题，请联系专用客服邮箱：ebook@turingbook.com。

在这可以找到我们：

微博 @图灵教育：好书、活动每日播报
微博 @图灵社区：电子书和好文章的消息
微博 @图灵新知：图灵教育的科普小组
微信 图灵访谈：ituring_interview，讲述码农精彩人生
微信 图灵教育：turingbooks